



Rôle de la microstructure des sols argileux dans les processus de retrait-gonflement : de l'échelle de l'éprouvette à l'échelle de la chambre environnementale

Thanh Danh Tran

► To cite this version:

Thanh Danh Tran. Rôle de la microstructure des sols argileux dans les processus de retrait-gonflement : de l'échelle de l'éprouvette à l'échelle de la chambre environnementale. Sciences de la Terre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Français. NNT : 2014ENMP0002 . pastel-00960395

HAL Id: pastel-00960395

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00960395>

Submitted on 18 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 398 : Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité “ Géologie de l'ingénieur ”

présentée et soutenue publiquement par

Thanh Danh TRAN

le 13 janvier 2014

**Rôle de la microstructure des sols argileux dans
les processus de retrait-gonflement : de l'échelle de l'éprouvette à
l'échelle de la chambre environnementale**

Directeur de thèse : **Roger COJEAN**
Co-encadrante de la thèse : **Martine AUDIGUIER**

Jury

M. Richard FABRE, Professeur, Université Bordeaux 1
M. Jean-Marie FLEUREAU, Professeur, Ecole Centrale Paris
M. Roger COJEAN, Directeur de recherche, MINES ParisTech
M. Yu-Jun CUI, Directeur de recherche, Ecole des Ponts ParisTech
M. Benoît DEFFONTAINES, Professeur, Université de Marne-la-Vallée
M. Aurèle PARRIAUX, Professeur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
M. Anh Minh TANG, Chargé de recherche - HDR, Ecole des Ponts ParisTech
Mme Martine AUDIGUIER, Chargée de recherche, MINES ParisTech

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Président
Examineur
Examineur
Invitée

**T
H
È
S
E**

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon Directeur de thèse, Monsieur Roger COJEAN, Directeur de recherche à Mines ParisTech, pour m'avoir accordé la grande disponibilité, le soutien et la confiance.

J'adresse tout particulièrement mes vifs remerciements à Madame Martine AUDIGUIER, Chargée de recherche à Mines ParisTech ; Monsieur Yu-Jun CUI, Directeur de recherche à Ecole des Ponts ParisTech ; Monsieur Anh Minh TANG, Chargé de recherche à Ecole des Ponts ParisTech qui ont co-encadré mon travail. Leurs conseils, leurs encouragements, et leur disponibilité ont permis de mener à bien ce travail.

Je souhaite à remercier respectueusement Monsieur Benoit DEFFONTAINES, Professeur à l'Université de Marne-la-Vallée, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux rapporteurs, Monsieur Richard FABRE, Professeur à l'Université Bordeaux 1 et Monsieur Jean-Marie FLEUREAU, Professeur à l'Ecole Centrale Paris, qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail. Je remercie au même titre Monsieur Aurèle PARRIAUX, Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne pour sa participation à l'évaluation de mon travail.

Mes remerciements s'adressent à l'ensemble des personnes qui a contribué au travail de cette thèse, et plus particulièrement à toutes les équipes expérimentales du Centre de Géosciences de Mines ParisTech et du laboratoire Navier Géotechnique, Madame Yasmina HABAOUI, Monsieur Marc MAILLY, Monsieur José ROSELLY-BENOIT, Monsieur Jean SOUVIROU, Madame Christine FRANKE, Madame Noëlia CARRILLO, Monsieur Emmanuel DE LAURE, Monsieur Baptiste CHABOT, Monsieur Xavier BOULAY et Monsieur Hocine DELMI pour leur aide lors de la réalisation des essais.

Je remercie enfin tous mes amis et toute ma famille pour leurs encouragements et leur soutien permanent.

Résumé

Ce travail est réalisé dans la perspective de sécheresses géotechniques et de dommages sur le bâti pavillonnaire. Les processus de retrait-gonflement des sols argileux sont à l'origine des déformations de ces sols et des dommages au bâti. En cours d'humidification ou de dessiccation, des mécanismes multiples se réalisent, prenant leur source dans la nature minéralogique et la microstructure de ces sols. Ainsi, dans cette thèse, les processus de retrait-gonflement de deux formations de sols argileux en France qui sont les Argiles Plastiques du Sparnacien (AP) et l'argile d'Héricourt (AH) du Lias sont étudiés à différentes échelles et différents états (intact, remanié, compacté et traité à la chaux) en considérant spécialement le rôle de la microstructure. Pour ce faire, une partie de la recherche est réalisée sur la caractérisation des sols étudiés afin d'analyser leurs propriétés minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques en rapport avec leurs propriétés de retrait-gonflement. La deuxième partie de la recherche est consacrée à l'analyse des processus de gonflement, de retrait, de fissuration des sols au cours d'un cycle simple ou de cycles répétés d'humidification-séchage, à l'échelle de l'éprouvette. Les processus de retrait-gonflement de l'argile d'Héricourt ont été étudiés à une échelle plus grande dans la troisième partie, en réalisant des essais d'infiltration et d'évaporation dans une chambre environnementale. Les résultats obtenus mettent en évidence les différences de comportement au retrait-gonflement pour différents états des sols étudiés. Par ailleurs, le rôle de la microstructure des sols argileux dans leur comportement au retrait-gonflement est mis en évidence au travers des différentes sollicitations hydriques conduites au laboratoire, avec l'aide de la porosimétrie au mercure et l'observation au microscope électronique à balayage. On peut concevoir que les phénomènes de retrait-gonflement trouvent leur origine principale dans la nature minéralogique de la fraction argileuse des sols, mais leurs micro-structures jouent aussi un rôle très important car elles contrôlent les modalités d'accès des molécules d'eau dipolaires aux sites d'adsorption présents à la surface, externe ou interne, des minéraux argileux.

L'établissement des caractéristiques minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques des Argiles Plastiques du Sparnacien (AP ou APS, APM et API) et de l'argile d'Héricourt (AH) dans la première partie de la recherche permet de poser les bases d'une comparaison avec d'autres sols argileux et en particulier les Argiles Vertes de Romainville (AVR) et les Marnes Bleues d'Argenteuil (MBA) étudiés au laboratoire dans des travaux antérieurs.

Dans la deuxième partie de la recherche, à l'échelle de l'éprouvette, l'étude du phénomène de gonflement des sols argileux (AP et AH) à l'état naturel, remaniés ou compactés permet de retrouver à nouveau que le potentiel de gonflement et la pression de gonflement dépendent fortement de l'état initial du sol (teneur en eau, masse volumique sèche). L'étude des échantillons de AP et la comparaison avec l'étude des échantillons de AVR et MBA ont permis de confirmer le rôle de deux familles de facteurs dans les processus de retrait-gonflement des sols argileux. Premièrement, la composition minéralogique : les Smectites et interstratifiés Illite-Smectite favorisent le gonflement, ce qui n'est pas le cas de la Kaolinite. Le gonflement est contrarié par la présence de carbonates mais aussi de quartz, la présence de ces minéraux limitant l'influence des minéraux argileux. A l'état intact, le gonflement libre dépend du taux de carbonates ou de quartz. Deuxièmement, la microstructure : pour un pourcentage en carbonates ou en quartz donné, la sensibilité au gonflement est plus importante pour le sol remanié au laboratoire que pour le sol intact. En effet, le remaniement détruit, au moins partiellement, des éléments de microstructures qui contrariaient le gonflement : ponts carbonatés entre agrégats argileux dans les sols argileux carbonatés, amas

de grains de quartz insensibles au gonflement dans les sols argileux riches en quartz. En plus, l'étude des phénomènes de retrait et de la fissuration des sols argileux permet de souligner encore le rôle de la microstructure, en comparant les comportements de sols intacts et de sols remaniés au laboratoire, ce remaniement détruisant en grande partie la microstructure initiale. Les comportements différenciés de ces deux catégories de sols permet ainsi de bien mettre en évidence le rôle de la microstructure, tous autres paramètres (minéralogiques en particulier) restant inchangés. Les études du comportement des sols argileux sous sollicitations hydriques cycliques accélérées permettent de retrouver des résultats établis pour les Argiles Vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil : stabilisation des déformations dès le troisième cycle pour le sol intact (APM intact) et pour le sol compacté (AH compactée). Cependant, une augmentation progressive du volume apparaît, due à l'accumulation de gonflements résiduels. Ceci résulte d'une irréversibilité partielle du phénomène de retrait-gonflement. Les sollicitations hydriques cycliques n'ont aucune influence sur le comportement du sol traité à la chaux (AH traitée à la chaux) jusqu'au quatrième cycle.

Dans la troisième partie de la recherche, à l'échelle de la chambre environnementale, le processus de gonflement et de retrait d'un sol argileux traité à la chaux (AH) est étudié. Ces études ont pour but de faire des comparaisons avec les résultats obtenus à l'échelle de l'éprouvette et ceux obtenus sur le sol non-traité (AH). Un taux de gonflement dû à l'hydratation et l'expansion de la chaux en contact avec l'eau, comparable à celui obtenu à l'échelle de l'éprouvette pour le sol non-traité ainsi que pour le sol traité à la chaux, a été observé dans la chambre environnementale pendant la première phase d'humidification. Un effet de bord important a été observé à la surface, pour ce gonflement. La courbe de rétention d'eau et la courbe de conductivité hydraulique en fonction de la succion ont été déterminées par l'exploitation des données des phases de séchage dans la chambre environnementale. Une bonne concordance a été observée entre ces courbes de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale et celles de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux à l'échelle de l'éprouvette. En outre, l'effet d'échelle ou l'effet de profondeur est observé sur ces courbes, à l'échelle de la chambre environnementale. Le phénomène d'évaporation a été aussi étudié grâce aux données disponibles dans la chambre environnementale. La comparaison de l'évolution du taux d'évaporation en trois phases, pour l'argile d'Héricourt non-traitée et traitée à la chaux, permet de mettre en évidence le rôle de la microstructure dans le processus d'évaporation. Les microstructures des sols argileux contrôlent les processus de transfert d'eau dans ce type de sol, influençant la cinétique des échanges sol-atmosphère.

L'évolution de la microstructure des sols, à différentes échelles et pour différents états, est suivie grâce aux analyses de porosimétrie au mercure et aux observations au microscope électronique à balayage, au cours des cycles de retrait-gonflement. Il est ainsi possible de décrire les microstructures des sols argileux comme microstructures matricielles argileuses ou microstructures en agrégats naturels (pour les sols intacts et remaniés) et en agrégats compactés (pour les sols compactés et compactés traités à la chaux). C'est principalement la porosité inter-agrégats naturels, modifiée en cours d'humidification et de séchage, qui est responsable des variations de volume total du sol. La porosité intra-agrégat et la porosité inter-agrégats compactés n'affecte pas ou peu le volume total du sol en cours d'humidification et de séchage.

Ainsi, il apparaît que la microstructure des sols argileux joue un rôle important dans les processus de retrait-gonflement.

Mots clés : minéralogie, microstructure, retrait, gonflement, évaporation, chambre environnementale.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre 1 Caractéristiques minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques des sols étudiés.....</i>	<i>9</i>
1. Introduction	9
2. Matériaux étudiés : Argile Plastique et Argile d'Héricourt.....	9
2.1. Argile Plastique	9
2.2. Argile d'Héricourt	10
2.3. Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil	10
3. Caractérisation minéralogique	11
3.1. Méthode utilisée.....	11
3.2. Argile Plastique	13
3.3. Argile d'Héricourt	15
4. Caractérisation microstructurale	17
4.1. Méthodes utilisées	18
4.1.1. Observation par microscope électronique à balayage.....	18
4.1.2. Porosimétrie au mercure	19
4.2. Argile Plastique	19
4.3. Argile d'Héricourt	22
5. Caractérisation géotechnique.....	23
5.1. Méthodes utilisées	24
5.2. Argile Plastique	25
5.3. Argile d'Héricourt	27
6. Caractérisation hydrique	29
6.1. Méthodes utilisées	30
6.1.1. Méthode du papier-filtre	30
6.1.2. Méthode osmotique	30
6.1.3. Méthode de la pression en phase vapeur	31
6.1.4. Méthode du potentiomètre	32

6.2.	Courbe de rétention d'eau.....	32
6.2.1.	Courbe de rétention d'eau de l'Argile Plastique.....	32
6.2.2.	Courbe de rétention d'eau de l'argile d'Héricourt.....	35
6.2.3.	Courbe de rétention d'eau de l'argile d'Héricourt compacté non-traité et traité à la chaux	37
6.3.	Conductivité hydraulique de l'argile d'Héricourt compacté.....	37
6.3.1.	Mesure de la conductivité hydraulique	38
6.3.2.	Aspects microstructuraux	40
6.3.3.	Discussions et conclusions	41
7.	Conclusions	43
Chapitre 2 Analyse du processus de gonflement.....		45
1.	Introduction	45
2.	Protocoles d'essai et méthodes utilisées.....	45
3.	Résultats	47
3.1.	Gonflement libre et potentiel de gonflement	47
3.2.	Pression de gonflement.....	50
3.3.	Aspects microstructuraux du gonflement	52
4.	Analyse du gonflement par le modèle microstructural.....	61
4.1.	Modèle d'organisation microstructurale des sols fins compactés non saturés (Ferber 2005).....	62
4.2.	Adaptation à l'étude du gonflement libre des sols intacts.....	63
4.3.	Discussions	71
5.	Comparaisons entre les sols étudiés et conclusions.....	72
Chapitre 3 Analyse du retrait et de la fissuration des sols		73
1.	Introduction	73
2.	Protocoles d'essai.....	74
2.1.	Dessiccation des Argiles Plastiques intactes.....	74
2.2.	Dessiccation des Argiles Plastiques remaniées au laboratoire.....	75
3.	Résultats	75
3.1.	Retrait et fissuration des Argiles Plastiques intactes.....	75
3.2.	Retrait et fissuration des Argiles Plastiques remaniées au laboratoire.....	82
4.	Comparaisons entre les sols étudiés et conclusions.....	84

Chapitre 4 *Phénomènes de vieillissement rhéologique du sol soumis à des cycles hydriques accélérés..... 87*

1. Introduction	87
2. Protocoles d'essai	88
3. Résultats	89
3.1. Gonflement libre de l'Argile Plastique (APM) en fonction des cycles hydriques	89
3.2. Gonflement libre de l'argile d'Héricourt compactée en fonction de cycles hydriques	91
3.3. Aspects microstructuraux du gonflement libre en fonction des cycles hydriques	92
3.3.1. Argile Plastique	92
3.3.2. Argile d'Héricourt compactée	96
4. Comparaisons entre les sols étudiés et conclusions	100

Chapitre 5 *Essais d'infiltration et d'évaporation sur un sol argileux traité à la chaux dans la chambre environnementale..... 103*

1. Introduction	103
2. Sol étudié et dispositifs utilisés	103
2.1. Sol étudié	103
2.2. Chambre environnementale et capteurs utilisés.....	104
2.3. Procédure expérimentale.....	107
3. Développement des profils hydriques.....	109
3.1. Infiltration	109
3.1.1. Evolution des paramètres au cours de l'infiltration 1	109
3.1.2. Evolution des paramètres au cours de l'infiltration 2	113
3.2. Séchage	115
3.2.1. Evolution des paramètres au cours du séchage 1	115
3.2.2. Evolution des paramètres au cours du séchage 2	122
3.2.3. Exploitation des résultats	128
3.2.3.1 Courbe de rétention d'eau	128
3.2.3.2 Conductivité hydraulique.....	130
3.3. Discussions et comparaison avec les résultats de sol non-traité	132
3.3.1. Infiltration.....	132

3.3.2. Séchage.....	135
4. Evolution de la microstructure et de la fissuration de l'argile d'Héricourt dans la chambre environnementale.....	137
4.1. Evolution de la microstructure de l'argile d'Héricourt traitée	137
4.2. Fissuration du sol traité à la chaux au cours de séchage dans la chambre environnementale.....	147
4.3. Discussion et comparaison avec les résultats du sol non-traité.....	149
5. Conclusions	154
<i>Chapitre 6 Analyse du phénomène d'évaporation dans la chambre environnementale</i>	<i>157</i>
1. Introduction	157
2. Phénomène d'évaporation.....	158
2.1. Concepts d'évaporation	158
2.2. Processus d'évaporation	158
3. Modèles d'évaporation issus de la bibliographie.....	159
3.1. Modèles de base.....	160
3.2. Modèles couplés	163
4. Application des modèles d'évaporation dans la chambre environnementale	165
4.1. Exploitation des mesures pour le calcul du taux d'évaporation dans la chambre environnementale.....	165
4.2. Application des modèles pour l'estimation du taux d'évaporation dans la chambre environnementale	170
4.3. Discussions	178
4.4. Rôle des microstructures des sols argileux dans les phénomènes de transfert d'eau sol-atmosphère....	179
5. Conclusions	180
Conclusion générale et perspectives	183
Références bibliographiques	199
ANNEXE (<i>publications et communications</i>).....	215

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Caractérisation minéralogique des trois niveaux d'AP, de AVR et de MBA.....	14
Tableau 1.2 : Caractérisation minéralogique de AH.....	16
Tableau 1.3 : Normes utilisées pour la caractérisation géotechnique	24
Tableau 1.4 : Caractéristiques géotechniques de AP, AVR, MBA	26
Tableau 1.5 : Caractéristiques géotechniques de AH.....	28
Tableau 1.6 : Solutions salines saturées utilisées.....	31
Tableau 2.1 : Résultats du gonflement libre de l'ensemble des échantillons.....	47
Tableau 2.2 : Résultats du gonflement libre de l'argile d'Héricourt.....	49
Tableau 2.3 : Pression de gonflement de AP, AVR et MBA	51
Tableau 2.4 : Pression de gonflement de l'argile d'Héricourt.....	52
Tableau 2.5 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des Argiles Plastiques.....	53
Tableau 2.6 : Taux de gonflement des Argiles vertes de Romainville intacts (Yigzaw 2009)	64
Tableau 2.7 : Indice des vides des échantillons étudiés en porosimétrie au mercure avant et après gonflement (Yigzaw 2009).....	66
Tableau 3.1 : Observation de fissuration des éprouvettes de sols intacts.....	75
Tableau 3.2 : Observation de fissuration des éprouvettes de sols remaniés.....	82
Tableau 4.1 : Paramètres géotechniques des échantillons de APM soumis à des essais cycliques.....	88
Tableau 5.1 : Capteurs utilisés dans la chambre environnementale.....	106
Tableau 5.2 : Conditions des essais d'évaporation	109
Tableau I : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état intact	188
Tableau II : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état remanié.....	190
Tableau III : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état compacté.....	192
Tableau IV : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état traité à la chaux et compacté.....	193
Tableau V : Caractéristiques des microstructures de sols argileux étudiés	194

Liste des Figures

Figure 1.1 : Affleurements d'APS, APM et API.....	10
Figure 1.2 : Affleurements d'AVR et MBA (Yigzaw 2009).....	11
Figure 1.3 : Diffractogrammes RX de lame de poudres d'APS, APM, API	13
Figure 1.4 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles : (a) : APS, (b) : APM, (c) : API	14
Figure 1.5 : Diffractogrammes RX de lame de poudres de AH non-traité (NT) et traité à la chaux (après 0 jour : (J0), après 1 jour (J1) après 7 jours (J7), après 30 jours (J30), après 99 jours (J99))	15
Figure 1.6 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles de AH.....	16
Figure 1.7 : Courbes porosimétriques de APS, APM, API	20
Figure 1.8 : Photos MEB de APS intact.....	21
Figure 1.9 : Photos MEB de APM intact.....	21
Figure 1.10 : Photos MEB de API intact.....	22
Figure 1.11 : Courbes porosimétriques de AH.....	22
Figure 1.12 : Photos MEB de AH naturel	23
Figure 1.13 : Courbe granulométrique et sédimentométrique de APS, APM, API.....	25
Figure 1.14 : Diagramme de plasticité de AP, AVR, MBA	26
Figure 1.15 : Courbe granulométrique et sédimentométrique de AH	27
Figure 1.16 : Diagramme de plasticité de AH.....	28
Figure 1.17 : Courbes de rétention d'eau de : (a) APS, (b) APM, (c) API, (d) APS, APM et API.....	33
Figure 1.18 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de APS.....	34
Figure 1.19 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de APM.....	34
Figure 1.20 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de API.....	35
Figure 1.21 : Courbe de rétention d'eau de AH	36
Figure 1.22 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de AH.....	36
Figure 1.23 : Courbe de rétention d'eau de AH non-traitée et traitée à la chaux	37
Figure 1.24 : Taux de gonflement des sols.....	39
Figure 1.25 : Conductivité hydraulique des sols saturés	40
Figure 1.26 : Courbes porosimétriques des sols après gonflement	40
Figure 1.27 : Photos de MEB des échantillons après gonflement : a, c) Echantillon non-traité, b, d) Echantillon traité à la chaux.....	41

Figure 2.1 : Moule oedométrique.....	46
Figure 2.2 : Cinétique du gonflement des Argiles Plastiques.....	48
Figure 2.3 : Cinétique du gonflement de l'argile d'Héricourt.....	49
Figure 2.4 : Méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation. Exemple de API intact.....	50
Figure 2.5 : Méthode à volume constant. Exemple de API intact	50
Figure 2.6 : Courbes de distribution des rayons de pores (a : APS ; b : APM ; c : API).....	54
Figure 2.7 : Photos au MEB APS : Echantillon intact : a) état initial, b) après gonflement ; Echantillon remanié : c) état initial, d) après gonflement.	55
Figure 2.8 : Photos au MEB APM : Echantillon intact : a) état initial, b) après gonflement ; Echantillon remanié : c) état initial, d) après gonflement.	56
Figure 2.9 : Photos au MEB API : Echantillon intact : a) état initial, b) après gonflement ; Echantillon remanié : c) état initial, d) après gonflement.	57
Figure 2.10 : Courbes porosimétriques de l'échantillon naturel	58
Figure 2.11 : Photos au MEB de l'échantillon naturel : a) Etat initial, b) Après gonflement.....	58
Figure 2.12 : Courbes porosimétriques de l'échantillon remanié.....	59
Figure 2.13 : Photos au MEB de l'échantillon remanié : a) Etat initial, b) Après gonflement.....	59
Figure 2.14 : Courbes porosimétriques de l'échantillon compacté	60
Figure 2.15 : Photos au MEB de l'échantillon compacté : a, b) Etat initial, c, d) Après gonflement.....	61
Figure 2.16 : Influence de la masse volumique sèche initiale sur les taux de gonflement libre.....	64
Figure 2.17 : Influence de la teneur en eau initiale sur les taux de gonflement libre	65
Figure 2.18 : Influence de l'indice des vides initial sur l'indice des vides final.....	65
Figure 2.19 : Influence de l'indice des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de AVR.....	66
Figure 2.20 : Influence de l'indice des pores de taille $r > 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de AVR.....	66
Figure 2.21 : Evolution de la distribution des tailles de pores causée par le gonflement libre (Yigzaw 2009).....	67
Figure 2.22 : Courbes porosimétriques de EAVR-0, EAVR-1 et EAVR-C (Yigzaw 2009).....	68
Figure 2.23 : Comparaison entre des indices des vides calculés d'après le modèle et déterminés à partir des essais porosimétrique au mercure.....	69
Figure 2.24 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final des Marnes Bleues d'Argenteuil.....	70
Figure 2.25 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de APS	70
Figure 2.26 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de APM...70	
Figure 2.27 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de API.....	71

Figure 2.28 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de AH.....	71
Figure 3.1 : Comparaison entre le retrait surfacique et le retrait total des Argiles Plastiques (a : APS, b : APM, c : API)	76
Figure 3.2 : Cinétique de dessiccation des Argiles Plastiques lors du 1 ^{er} séchage	77
Figure 3.3 : Evolution du retrait surfacique en fonction du cycle de dessiccation (a : APS, b : APM, c : API) ...	78
Figure 3.4 : Exemples de photos d'échantillon de APS au cours des cycles de dessiccation-humidification	79
Figure 3.5 : Exemples de photos d'échantillon de API au cours des cycles de dessiccation-humidification	80
Figure 3.6 : Evolution des fissures à la surface d'échantillon de APM au cours des cycles de dessiccation-humidification.....	81
Figure 3.7 : Evolution du taux de fissures en fonction du cycle de dessiccation-humidification de l'échantillon de APM.....	81
Figure 3.8 : Variation de teneur en eau en fonction du temps pour les Argiles Plastiques (a : APS, b : APM, c : API) soumises à la dessiccation.....	83
Figure 3.9 : Exemples de photos de séchage pour APM remanié D=185 mm, H=24 mm, base rugueuse	84
Figure 4.1 : Cinétique de gonflement des échantillons de APM soumis alternativement à des phases d'imbibition-séchage : a) E1, b) E2, c) E3, d) E4.....	89
Figure 4.2 : Taux de gonflement et de retrait des échantillons de APM soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement/retrait ; b) Epaisseur des échantillons.	90
Figure 4.3 : Taux de gonflement et de retrait des échantillons de APM soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement cumulé et pour chaque cycle ; b) Taux de retrait pour chaque cycle	90
Figure 4.4 : Cinétique de gonflement des échantillons de AH compactée, soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Echantillon non-traité ; b) Echantillon traité à la chaux.....	91
Figure 4.5 : Taux de gonflement et de retrait des échantillons de AH compactée, soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement/retrait ; b) Epaisseur des échantillons.	92
Figure 4.6 : Taux de gonflement et retrait des échantillons de AH compactée, soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement cumulé et pour chaque cycle ; b) Taux de retrait pour chaque cycle.....	92
Figure 4.7 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile Plastique (APM) pour les cycles 1, 2, 4, 6 et 8.....	93
Figure 4.8 : Photos au MEB des échantillons de APM : a, b) état initial ; c, d) après 1 cycle de gonflement ; e, f) après 2 cycle de gonflement ; g, h) après 4 cycles de gonflement ; i, j) après 6 cycle de gonflement ; k, l) après 8 cycles de gonflement	96
Figure 4.9 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt (AH) compactée non-traitée pour les cycles 1 et 4.	97
Figure 4.10 : Photos au MEB des échantillons AH compactés non-traités : a, b) après 1 cycle de gonflement ; c, d) après 4 cycles de gonflement.....	98
Figure 4.11 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt (AH) compactée traitée à la chaux pour les cycles 1 et 4.	99

Figure 4.12 : Photos au MEB des échantillons AH compactés traités à la chaux : a, b) après 1 cycle de gonflement ; c, d) après 4 cycles de gonflement.....	100
Figure 5.1 : Dispositifs expérimentaux (Song 2014).....	104
Figure 5.2 : Vue schématique de la chambre environnementale (Song 2014)	105
Figure 5.3 : Evolution de la température du sol et de l'air au cours du temps après le compactage (avant le commencement de l'infiltration 1)	109
Figure 5.4 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour l'infiltration 1	111
Figure 5.5 : Gonflement 3-D à la surface du sol (à $t = 3$ jours après l'infiltration 1).....	113
Figure 5.6 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour l'infiltration 2.....	114
Figure 5.7 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour le séchage 1	118
Figure 5.8 : Variation de succion mesurée par trois types de capteur au cours du temps pour le séchage 1	120
Figure 5.9 : Profils de teneur en eau dans la chambre environnementale pour le séchage 1	121
Figure 5.10 : Profils de température dans la chambre environnementale pour le séchage 1	121
Figure 5.11 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour le séchage 2.....	124
Figure 5.12 : Variation de succion mesurée par tensiomètre au cours du temps pour le séchage 2	126
Figure 5.13 : Variation de succion mesurée par deux types de capteur au cours du temps pour le séchage 2	127
Figure 5.14 : Profil de teneur en eau dans la chambre environnementale pour le séchage 2	127
Figure 5.15 : Profil de température dans la chambre environnementale pour le séchage 2.....	128
Figure 5.16 : Courbe de rétention d'eau correspondant au séchage 1	129
Figure 5.17 : Courbe de rétention d'eau correspondant au séchage 2.....	129
Figure 5.18 : Conductivité hydraulique en fonction de la succion, pour le séchage 1	131
Figure 5.19 : Conductivité hydraulique en fonction de la succion, pour le séchage 2	131
Figure 5.20 : Variation de teneur en eau volumique au cours du temps pour l'infiltration 1 de l'argile d'Héricourt non-traitée (Song 2014).....	133
Figure 5.21 : Gonflement libre lors de l'infiltration 1 de l'argile d'Héricourt non-traitée (Song 2014)	134
Figure 5.22 : Profil de teneur en eau massique du sol à la fin du séchage 2	136
Figure 5.23 : Profil de masse volumique du sol à la fin du séchage 2.....	136
Figure 5.24 : Positions des prélèvements des échantillons dans la chambre environnementale pour l'étude microstructurale	138
Figure 5.25 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase d'humidification...	139

Figure 5.26 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase d'humidification : a, b : Echantillon au 0-50 mm ; c, d : Echantillon au -100-150 mm.....	140
Figure 5.27 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase de séchage	141
Figure 5.28 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase de séchage : a, b : Echantillon au niveau 0-50 mm ; c, d : Echantillon au niveau -50-100 mm ; e, f : Echantillon au niveau -100-150 mm	142
Figure 5.29 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase d'humidification .	143
Figure 5.30 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase d'humidification : a, b : Echantillon au niveau -50-100 mm ; c, d : Echantillon au niveau -100-150 mm	144
Figure 5.31 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase de séchage.....	145
Figure 5.32 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase de séchage : a, b : Echantillon au niveau 0-50 mm ; c, d : Echantillon au niveau -50-100 mm ; e, f : Echantillon au niveau -100-150 mm ; g, h : Echantillon au niveau -150-200 mm ; i, j : Echantillon au niveau -200-250 mm	147
Figure 5.33 : Photos de la surface du sol après le séchage 1 : a : $t = 5$ jours ; b : $t = 156$ jours	148
Figure 5.34 : Photos de la surface du sol après le séchage 2 : a : $t = 10$ jours ; b : $t = 140$ jours	148
Figure 5.35 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt non-traitée au niveau 0-50 mm dans la chambre environnementale après la 1 ^e saturation, après le 1 ^e , puis le 2 ^e séchage	150
Figure 5.36 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt non-traitée au niveau -150-200 mm dans la chambre environnementale après la 1 ^e saturation et le 2 ^e séchage	151
Figure 5.37 : Courbe de rétention d'eau obtenue par les courbes porosimétriques du sol traité à la chaux après la première phase d'humidification	152
Figure 5.38 : Courbe de rétention d'eau obtenue par les courbes porosimétriques du sol traité à la chaux après la deuxième phase d'humidification.....	152
Figure 5.39 : Fissuration à la surface de l'argile d'Héricourt non-traitée à la fin du séchage 1 (Song 2014)	153
Figure 5.40 : Taux de fissures en fonction de la teneur en eau volumique (Song 2014).....	154
Figure 5.41 : Taux de fissures en fonction de la succion (Song 2014).....	154
Figure 6.1 : Cycle de l'eau	158
Figure 6.2 : Courbe classique montrant les trois phases d'évaporation dans un sol (Yanful et Choo. 1997)	159
Figure 6.3 : Différents composants du bilan d'énergie : (a) bilan de rayonnement, (b) bilan d'énergie de jour et (c) bilan d'énergie de soir (d'après Tanner 1968 ; cité par Hillel 2004)	160
Figure 6.4 : Schéma de transfert de vapeur d'eau avec les résistances (Aluwihare et Watanabe 2003)	161

Figure 6.5 : Schéma des trois phases de transfert de la vapeur d'eau du sol vers l'atmosphère (Aluwihare et Watanabe 2003).....	162
Figure 6.6 : Relation entre AE/PE et la succion (Wilson et al. 1997)	165
Figure 6.7 : Taux d'évaporation mesuré lors du séchage 1	167
Figure 6.8 : Taux d'évaporation mesuré lors du séchage 2	167
Figure 6.9 : Relation entre AE et le débit d'air.....	168
Figure 6.10 : Evaporation cumulée lors du séchage 1	168
Figure 6.11 : Evaporation cumulée lors du séchage 2	169
Figure 6.12 : Comparaison de CAE lors du séchage 1	169
Figure 6.13 : Comparaison de CAE lors du séchage 2	170
Figure 6.14 : Evolution de la vitesse du vent au cours du séchage 1	172
Figure 6.15 : Evolution de la vitesse du vent au cours du séchage 2	172
Figure 6.16 : Calibration des paramètres de la formule [6.19].....	172
Figure 6.17 : PE calculé par [6.22] et PE mesuré lors du séchage 1	173
Figure 6.18 : PE calculé par [6.22] et PE mesuré lors du séchage 2	173
Figure 6.19 : Courbe de van Genuchten pour le séchage 1 (couche de sol 0-25 mm).....	174
Figure 6.20 : Courbe de van Genuchten pour le séchage 2 (couche de sol 0-25 mm).....	174
Figure 6.21 : Succion à la surface lors du séchage 1	175
Figure 6.22 : Succion à la surface lors du séchage 2.....	175
Figure 6.23 : Evolutions de PE , AE/PE , AE lors du séchage 1	176
Figure 6.24 : Evolutions de PE , AE/PE , AE lors du séchage 2	177
Figure 6.25 : Evolutions des taux d'évaporation pour différentes conditions de niveau d'eau (Yang et Yanful 2002).....	180

Introduction générale

Dans le contexte du changement climatique, les caractéristiques de variabilité des climats pourraient évoluer, s'agissant de la fréquence et de l'intensité de certains événements climatiques extrêmes : précipitations et sécheresses en particulier. Les phénomènes de sécheresse entraînent des dommages considérables sur le bâti pavillonnaire, surtout ceux fondés sur les sols argileux. En France notamment, la sécheresse occupe le deuxième poste d'indemnisation des victimes après les inondations. Face à cet enjeu économique et social important, de nombreuses études ont été menées sur le phénomène de la sécheresse géotechnique dans le but de définir des mesures de prévention en rapport avec les règles de construction et la gestion de l'environnement du bâti.

Ces études doivent être développées afin de mieux comprendre les processus de retrait-gonflement des sols argileux à l'origine des dommages au bâti. Dans ces études, le « *gonflement* » est un terme utilisé souvent de manière indifférente pour définir une augmentation de volume du matériau, quelle qu'en soit la cause : un déchargement mécanique, une imbibition ou une sorption ou des variations chimiques. En revanche, la diminution de volume du sol est décrite par le terme « *tassement* » dans le cas d'un chargement mécanique, par le terme « *retrait* » pour la diminution de volume causée par un séchage et par le terme « *effondrement* » dans le cas d'une saturation d'un sol (cas des loess en particulier) sous de fortes charges.

A l'échelle macroscopique, la déformation du sol, tassement ou soulèvement, est le résultat de la modification de l'état de contraintes suite à une modification d'un chargement mécanique. Par ailleurs, un changement dans l'environnement hydrique du sol conduit à une modification des pressions interstitielles, ce qui influence son état de contraintes effectives, et induit aussi des variations de volume. A cette échelle, plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier l'effet des facteurs climatiques, géologiques et géotechniques sur le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. D'après Chen et Ma (1987), les propriétés du sol et les conditions environnantes sont des facteurs importants contrôlant ces phénomènes.

Parmi les paramètres géotechniques du sol, la teneur en eau et la masse volumique sèche jouent un rôle important dans le processus de retrait-gonflement. Ces deux paramètres sont donc l'objet de nombreuses études dans la bibliographie : Kassif et Ben Shalom (1971), Pusch (1982), Gray et al. (1984), Sridharan et al. (1986), Komine et Ogata (1992, 1994, 1996, 2003), Kanno et Wakamastu (1992), Basma et al. (1995), Guiras-Skandaji (1996), Dixon et al. (1996), Xu et al. (2003). Certains auteurs montrent que la pression de gonflement dépend seulement de la densité sèche initiale (ou de l'indice des vides) du sol et qu'elle est indépendante de la teneur en eau initiale. D'autres démontrent que la pression de gonflement des sols augmente lorsque la densité sèche initiale augmente et lorsque la teneur en eau initiale diminue. D'autres encore trouvent que l'effet de la teneur en eau initiale sur le taux et la pression de gonflement n'est pas significatif lorsque cette valeur est inférieure à la limite de retrait du sol mais que son effet devient important lorsqu'elle est supérieure.

Outres les deux paramètres géotechniques ci-dessus, l'effet d'autres paramètres qui influencent le processus de retrait-gonflement a été aussi étudié dans plusieurs travaux : la durée de l'essai et la taille de l'échantillon (Vayssade 1978 ; Chen 1988), la température (Robinet et al. 1996 ; Tessier et al. 1998 ; Sultan et al. 2002), l'histoire des contraintes subies par le matériau et la contrainte verticale appliquée (Alonso et al. 1999 ; Cui et al. 2002), les cycles de séchage-remouillage (Dif et Bluemel 1991 ; Day 1994, 1995 ; Al-Homoud et al.

1995 ; Basma et al. 1996). En plus, les effets du climat, de la topographie, de la végétation et des conditions hydrologiques sur le retrait-gonflement sont étudiés aussi dans Wilding et Tessier (1988). On note toujours que les mesures faites au laboratoire sont parfois différentes des observations de terrain à cause de l'effet d'échelle (différence de taille entre une éprouvette et un massif) et un échantillon de sol ne représentera jamais l'ensemble des couches géologiques qui interviennent dans la réponse du massif.

L'augmentation ou la diminution de volume des éléments à l'échelle microscopique dans un sol argileux est à l'origine du retrait-gonflement macroscopique d'une éprouvette ou d'un massif de ce sol. A cette échelle microscopique, en cours d'humidification, l'apport d'eau dans le sol et sa fixation au niveau de certaines particules élémentaires ou plaquettes agglomérées en feuillets constituant les argiles conduit à des phénomènes d'hydratation de ces particules entraînant une augmentation de volume total du sol. En revanche, au cours du séchage, la dessiccation provoque en général un rapprochement des particules et une réduction de leur nombre, par suite du regroupement des particules les plus fines, entraînant ainsi une augmentation du nombre moyen de feuillets par unité. Si le séchage est assez fort, l'eau dans l'espace interfoliaire peut être éliminée, la distance interfoliaire diminue et le nombre de feuillets par particule augmente. Cette diminution de la distance interfoliaire cause la réduction du volume de la particule argileuse et produit donc une contraction macroscopique du matériau ou le retrait. Ainsi, le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux trouve son origine dans la nature de la fraction argileuse des sols ainsi que dans sa microstructure qui contrôle l'accès des molécules d'eau dipolaires aux sites d'adsorption des minéraux argileux. L'étude de la microstructure des sols argileux est donc primordiale.

Pour comprendre le mécanisme de gonflement du sol argileux à l'échelle microscopique, plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier l'interaction eau-argile dans le phénomène d'hydratation des particules argileuses. On identifie deux types d'eau à l'échelle des particules : l'eau « *interne* » et l'eau « *externe* ». L'eau interne est l'eau correspondant à l'hydratation des cations échangeables et l'eau pénétrant dans l'espace interfoliaire par le mécanisme d'osmose. L'eau externe se trouve dans les pores inter-particulaires et inter-agrégats (Qi 1996). La proportion d'eau interne et externe dépend de la nature de l'argile, des cations échangeables, de la température et de la salinité de l'électrolyte (Turki 1983 d'après Durand et al. 1995). Il existe également deux autres qualificatifs relatifs à l'eau à l'échelle microscopique : l'eau *adsorbée* et l'eau *capillaire* qui correspondent aux phénomènes d'hydratation par adsorption et d'hydratation par capillarité. Pour l'hydratation par adsorption, en présence de vapeur d'eau, les minéraux argileux adsorbent de l'eau (molécule dipolaire) sur leur surface libre grâce à l'existence d'un déficit de charge et à la présence de sites actifs sur les particules argileuses. Au cours de l'imbibition d'un matériau sec, les molécules d'eau se fixent sur les sites hydrophiles en formant un film d'eau monomoléculaire continu à la surface des particules. Puis, apparaît un phénomène d'adsorption multicouche sur ce film, correspondant à la superposition de n couches monomoléculaires de molécules d'eau correspondant à l'eau adsorbée (Prost 1990). La rétention d'eau dépend de la taille des particules et des agrégats, de l'énergie d'hydratation des cations compensateurs et aussi des différents types de porosité. Ainsi, les Smectites qui ont une surface accessible à l'eau beaucoup plus élevée que celle de l'Illite ou de la Kaolinite retiennent beaucoup plus de molécules d'eau d'hydratation (Van Damme 2002). L'eau, à partir de transferts en phase vapeur, qui n'est pas adsorbée sur les sites hydrophiles de l'argile, mais est retenue par condensation aux points de contact entre particules ou agrégats est appelée eau capillaire. En phase vapeur, l'hydratation par capillarité a lieu donc tout d'abord aux points de contact entre les particules et puis par remplissage des pores (Prost 1990). En outre, il y a un autre

phénomène d'hydratation, l'hydratation par osmose, sous forme d'eau liquide. Dans cette hydratation, l'eau est attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage des feuillets. Pour expliquer ce phénomène d'hydratation, on utilise le modèle de la double couche diffuse où les cations compensateurs ne sont pas maintenus directement à la surface de la particule argileuse mais sont présents à une distance moyenne de la surface. Les cations inter-foliaires, bien qu'hydratés, sont attirés par la surface négative des feuillets. Ce modèle repose sur l'hypothèse que la population des cations attirés par la surface pour rétablir l'électroneutralité à son voisinage, peut être séparée en deux couches : une couche de cations immobiles liés à la surface, couche de Stern, et une deuxième couche de cations mobiles au voisinage de la surface, couche diffuse (Gouy 1910, Chapman 1913, Stern 1924). Si la concentration de l'eau libre de la solution est inférieure à celle de l'eau de la double couche, une migration des molécules d'eau se produit, de la solution vers les particules argileuses, par phénomène d'osmose et cause donc une dilution des ions dont la concentration est élevée à l'intérieur de l'espace interfoliaire.

Correspondant aux phénomènes d'hydratation décrit ci-dessus, on note aussi dans la littérature deux phénomènes de gonflement des sols argileux : gonflement interfoliaire ou gonflement cristallin et gonflement interparticulaire ou gonflement osmotique. D'après les analyses minéralogiques, on note que certaines argiles, dont les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins. L'eau peut donc pénétrer à l'intérieur des particules et s'organiser en couches monomoléculaires en causant le gonflement interfoliaire. C'est le cas des Smectites telles que la Montmorillonite sodique et la Montmorillonite calcique (Norrish 1954 ; Tessier 1984 ; Cases et al. 1990). Ce gonflement intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse et peut présenter une ampleur très importante. L'autre gonflement est le gonflement interparticulaire où l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argiles. Contrairement au gonflement interfoliaire, ce gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée mais affecte toutes les argiles (Mouroux et al. 1988). Le processus de gonflement interparticulaire ou osmotique est lié, séparément ou de façon combinée, à des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés et est généralement illustré par le modèle de la double couche diffuse.

On a cherché à relier le gonflement à l'échelle macroscopique à la nature de la fraction argileuse des sols ainsi qu'à leur microstructure. D'après Basma et al. (1995), Serratrice et Soyez (1996), le processus de retrait-gonflement des sols est influencé non seulement par la nature des argiles mais aussi par leur état de cristallinité, par la quantité de minéraux non argileux, l'arrangement des particules entre elles et la présence de toute matière susceptible de les cimenter. Concernant l'effet de la nature minéralogique d'un sol, Tabani (1999) a montré que le taux de gonflement et la pression de gonflement augmentent lorsque le pourcentage massique de bentonite augmente. De plus, Komine et Ogata (1994) et Basma et al. (1995) ont indiqué que la pression de gonflement maximale augmente avec l'augmentation de la fraction argileuse. D'après Yong et Warkentin (1975), Wilding et Tessier (1988), la présence de minéraux non argileux dans le sol augmente la force de friction due aux interactions entre particules et donc entraîne une diminution du phénomène de retrait-gonflement. Ce phénomène peut aussi être expliqué par la microstructure : dans les sols où la quantité de particules non argileuses est suffisante pour que les grains soient en contact direct ou à proximité les uns des autres, ils forment un squelette semi-rigide qui subit peu de rétraction au séchage. Au contraire, la matrice argileuse englobe les grains et le départ d'eau adsorbée se traduit au cours du séchage par une rétraction importante du volume poreux total (Audiguier et Delage 1987). Pour le sol à dominante argileuse, le gonflement est affecté par l'arrangement initial des particules argileuses ou leur réarrangement pendant ce processus.

Tran (1987) a trouvé que la pression de gonflement et le gonflement libre sont plus élevés lorsque les particules argileuses sont majoritairement parallèles entre elles. De plus, les sols à structure matricielle présentent un retrait plus important qu'un sol composé de mottes ou d'agrégats lors d'une augmentation de succion (Delage et Cui 2000). D'après Audiguier et al. (2008) et Yigzaw (2009), la cimentation limite l'ampleur du gonflement et la déstructuration d'un sol peut amplifier le gonflement.

Concernant la description des microstructures des sols argileux, elle est depuis longtemps une préoccupation des chercheurs dans le domaine géotechnique parce qu'on a rapidement cherché à expliquer les phénomènes observés à l'échelle macroscopique par des mécanismes opérant à l'échelle élémentaire (Lambe 1958 d'après Ferber 2005). Dans les sols argileux, les phénomènes élémentaires ont lieu à l'échelle des plus petites particules argileuses où leur taille est de l'ordre du micromètre. Ainsi, le besoin des moyens expérimentaux pour réaliser des observations à cette échelle apparaît. Ces moyens expérimentaux ne sont apparus que vers la moitié du XX^{ème} siècle, avec le développement des microscopes électroniques à balayage (MEB) (Le Gressus 1995). En plus, la porosimétrie par injection de mercure qui peut apporter une description quantifiée de la microstructure est apparue aussi pour compléter le MEB dans les années 1960 (Pellerin 1979). Pour ces deux méthodes complémentaires d'étude des microstructures, il a été longtemps nécessaire de préparer spécifiquement les échantillons par lyophilisation (Le Roux 1971). Cette préparation reste encore aujourd'hui indispensable. En outre, d'autres méthodes ont été développées afin de décrire la microstructure des sols argileux, telles que la microscopie électronique par transmission (Tessier 1984) ou la microscopie optique sur des lames minces imprégnées de résines colorées (Cuisinier et Masrouri 2004). Parmi ces techniques de description de la microstructure, le microscope électronique à balayage et la porosimétrie au mercure sont largement utilisés du fait de leur complémentarité : le MEB permet de décrire précisément mais qualitativement les microstructures, en observant la surface des échantillons tandis que la porosimétrie au mercure permet, au contraire, de décrire de manière quantitative la distribution des tailles de pores (en réalité : rayons d'accès aux pores) au sein de l'échantillon, sans donner toutefois d'indication sur leur répartition dans l'espace (Delage et al. 1996). Cependant, on note que la dimension des échantillons analysés est de l'ordre du centimètre et cette dimension est à la fois 10000 fois plus importante que la taille des particules argileuses, mais le volume de ces échantillons est aussi 1000 fois plus faible que celui d'un moule CBR. La représentativité pour ces deux méthodes reste donc encore une question, à considérer dans les interprétations (Ferber 2005).

Grâce à ces outils utilisés par plusieurs chercheurs depuis les années 1960-1970 pour décrire les microstructures des sols, beaucoup d'informations dans ce domaine sont ainsi récoltées et ont permis d'approcher l'organisation microscopique des sols, et en particulier des sols argileux. Plusieurs concepts, définitions des microstructures, descriptions des espaces poreux sont présentés par différents auteurs. Dans la littérature anglo-saxonne, deux mots : « *fabric* » et « *structure* » sont les plus utilisés et se réfèrent en général aux arrangements de particules et/ou aux associations de particules et de l'espace poreux dans les sols (Mitchell 1993). En outre, le terme « *microfabric* ou *microstructure* » est utilisé pour désigner l'association des particules élémentaires au sein des agrégats et le terme « *macrofabric* ou *macrostructure* » pour l'arrangement des agrégats entre eux. Dans la bibliographie en français, on utilise indifféremment le mot *texture* et le mot *structure*. Actuellement, le mot *microstructure* est de plus en plus utilisé dans la littérature pour désigner l'arrangement spatial des unités du sol.

En général, les sols argileux naturels sont un mélange de particules de natures et de tailles différentes. Elles sont le plus souvent agrégées et présentent des associations de constituants

de taille croissante, emboîtées les unes dans les autres (Delage et Lefebvre 1984). Un grand nombre de vocabulaires spécifiques est présenté dans différents travaux concernant l'étude de ces associations. Par exemple, d'après Tessier (1984), l'assemblage des argiles comprend plusieurs niveaux superposés, des plus petites tailles aux plus grandes : 1) le *feuillelet* ; 2) la *particule primaire* (ou le cristallite élémentaire) qui est un empilement de feuillet ; 3) l'*unité morphologique*, plus petite unité stable, qui peut être le cristallite élémentaire isolé (cas de la Kaolinite) composé de feuillet sous forme de plaquettes, le micro-domaine (cas des Illites) composé d'agrégats de cristallites, eux même composés de 5 à 7 feuillet anhydres, et le quasi-cristal (cas des Smectites) formé par l'accolage face à face des feuillet de Smectites ; 4) l'*association des unités morphologiques*. Ou encore d'après Yong (1999), la hiérarchie d'organisation des argiles se présente de la façon suivante, des plus petites tailles aux plus grandes : 1) *feuillelet* ; 2) *particules* ; 3) *domaines* ; 4) "*cluster*" ; 5) "*ped*" où les « *ped*s » représentent l'unité constitutive des argiles observable à l'oeil nu (macroscopique), formée par une association de "*clusters*" de taille microscopique alors que les domaines sont ultra-microscopiques (observables en microscopie électronique) et composés de deux ou trois particules. En bref, la microstructure d'un sol argileux est l'organisation de diverses unités argileuses en association avec des éléments non argileux.

Concernant les types de microstructure identifiés, selon certains auteurs et les méthodes utilisées pour la caractérisation des sols, différentes classifications de la microstructure des sols ont été proposées. Par exemple, selon Van Olphen (1963) avec des possibilités d'assemblages géométriques des particules argileuses en suspension, il y a trois modes d'associations, liés aux charges de surface et de bord des feuillet d'argiles : *bord-face* (B-F), *bord-bord* (B-B) et *face-face* (F-F). Collins et Mc Gown (1974), en complétant le schéma de microstructure de Van Olphen dans le cas de sols contenant une proportion non négligeable de grains non argileux, ont introduit dans leur classification les relations existant entre particules argileuses et grains sableux ou silteux : connexions argileuses entre grains silteux, agrégats irréguliers en nid d'abeille, agrégats réguliers, particules argileuses entrelacées avec ou sans inclusion silteuse, matrice argileuse ou matrice granulaire. Le Roux (1975), à partir d'observations au MEB, a défini trois classes principales de textures : *texture homogène*, *texture orientée*, *texture floconneuse* ou en *microagrégats*. Sergeyev et al. (1978), en travaillant sur les sols d'origine sédimentaire, ont défini cinq types de microstructure : *en nid d'abeille* ; *en squelette* ; *matricielle* ; *fluidale* ; *laminaire*. Selon Gens et Alonso (1992) qui se sont basés en particulier sur les travaux de Collins et Mac Gown (1974), il y a deux types de microstructure pour les sols gonflants : microstructure « *matricielle* » qui est dominée par l'arrangement des particules élémentaires (des feuillet sous la forme de plaquettes), microstructure « *agrégée* » qui est composée par des grains (assemblage de particules). D'où, trois niveaux microstructuraux peuvent être distingués : l'*infra*, la *micro* et la *macro-structure* correspondant respectivement aux particules élémentaires, aux agrégats et à l'arrangement des agrégats entre eux.

Pour les définitions des espaces poreux, en raison de l'existence des différents modèles de microstructure, on a aussi différentes définitions de ces espaces poreux avec la même richesse terminologique : vides inter-(foliaires, lamellaires, particulaires, agrégats), intra-(particulaire, agrégat, domaine) ou micro-pores, méso-pores, macro-pores. Parmi eux, la classification des pores donnée par Touret et al. (1990) est la plus complète et passe en revue les différents types d'espace poreux dans les sols argileux. Dans cette classification, quatre types d'arrangement de l'espace poreux sont proposés : l'*espace interfoliaire* (ou *interlamellaire*) existant à l'intérieur des empilements périodiques de feuillet au sein des paquets (ou «particules») ; les *pores lenticulaires* correspondant aux zones de défauts qui sont dues à la

déformabilité ou à la flexibilité des feuillets ; les *pores interparticulaires* correspondant à la porosité entre « particules », au sein d'entités plus grandes appelées « agrégats » ; les *pores inter-agrégats* correspondant aux vides entre les agrégats. Quelques classifications quantitatives des espaces poreux sont également apparues dans différents travaux. Par exemple, Cases et al. (1990) ont distingué 4 types d'espace poreux suivant leur diamètre : ultramicroporosité ($d < 0,8$ nm), microporosité ($0,8 \text{ nm} < d < 2$ nm), mésoporosité ($2 \text{ nm} < d < 50$ nm) et macroporosité ($d > 50$ nm). En se basant sur les travaux de différents auteurs, Al-Mukhtar et al. (1996) et Robinet et al. (1996) ont donné aussi des valeurs de taille moyenne des classes de pores : pores interfeuillets ou intraparticulaires (de 1 à 2,5 nm), pores interparticulaires ou intra-agrégats (de 2,5 à 150 ou 200 nm) et pores inter-agrégats (supérieure à 150 ou 200 nm).

On trouve ainsi qu'il existe plusieurs terminologies dans la description des microstructures des sols argileux. En plus, l'organisation des particules d'argiles est très variable et dépend du type d'argile ou de sol (origine sédimentaire, éluviale,...), et de l'état de consolidation. Le comportement hydrique et mécanique des sols argileux dépend de cette organisation et plus particulièrement de la cohésion ou de la liaison entre les différentes entités (particules, agrégats, grains,...) dans cette organisation. La morphologie de cet assemblage contrôle les interactions eau-sol et donc les phénomènes de retrait-gonflement (Yigzaw 2009).

Grâce aux moyens expérimentaux développés et en utilisant des terminologies présentées ci-dessus, de plus en plus de travaux d'étude sur les modifications des microstructures des sols argileux sous sollicitations hydriques ont été réalisés. Comme indiqué dans beaucoup de travaux, les sols argileux sont organisés à différentes échelles et à chaque échelle correspond une texture du matériau à l'équilibre dans des conditions mécaniques et hydriques données ou appliquées (Al-Mukhtar et al. 1996). Un changement de ces conditions peut entraîner la modification de la microstructure du sol. En général, l'humidification et la dessiccation provoquent une réorganisation de la phase solide. D'après Tessier (1984), l'évolution de la microstructure d'un sol argileux sous des sollicitations hydriques dépend du type d'argile et des cations compensateurs et aussi de la succion appliquée. En fait, par les observations au MEB, il a trouvé que la dessiccation favorise une réorganisation de la microstructure avec une orientation préférentielle des particules pour des faibles succions (jusqu'à 0,1 MPa), suivie ensuite d'une désorganisation. En général, la dessiccation provoque dans les Smectites un rapprochement des particules constitutives et ainsi une réduction de leur nombre, par suite du regroupement des particules les plus fines entraînant une augmentation du nombre moyen de feuillets par unité. Cette réorganisation de la phase solide dépend beaucoup des niveaux de succion appliquée (Ben Rhaïem et al. 1987). Au cours de la dessiccation, pour des Smectites, quelle que soit la nature des cations échangeables et la concentration de la solution, on observe une réduction de la taille des pores et une diminution du nombre de pores. Pour les Illites et les Kaolinites, on observe une réorganisation des particules qui tendent à se disposer face à face. Quand la succion augmente, l'organisation des microdomaines et des cristallites isolés s'orientent fortement avec l'évolution des particules vers une organisation où elles sont toutes en contact. La dessiccation modifie la configuration de la microstructure, l'orientation et la surface spécifique des particules. La taille des particules argileuses dépend de la variation de succion du sol (Wilding et Tessier 1988). La diminution de la taille et du nombre de pores au cours de la dessiccation provoquent donc une réduction de volume ou une contraction macroscopique du sol, c'est à dire le phénomène de retrait. Un phénomène similaire est aussi observé sur des sols naturels. En analysant des spectres de porosité des sols argileux naturels, Audiguier (1979) a montré que, pour des matériaux à matrice argileuse soumis à des potentiels matriciels croissants, le séchage a lieu avec rétraction en provoquant une

diminution de la dimension des pores et une diminution de la porosité totale, contrairement aux matériaux à squelette granulaire où le séchage entraîne une augmentation de la dimension des pores et une diminution de la porosité totale.

Au contraire de la dessiccation, pendant la phase d'humidification, l'absorption d'eau semble conduire à un écartement des particules constitutives de l'argile et une diminution du nombre de feuillets par particule élémentaire (ou quasicristal). Autrement dit, le processus de gonflement résulte d'un phénomène de décollement des quasi-cristaux et donc d'un accroissement du nombre de cristaux (Saiyouri et al. 1998). En général, ce processus n'est pas complètement réversible. La réversibilité du système semble se limiter à l'espace interfoliaire et la taille des quasi-cristaux dépend du niveau de contrainte hydrique auquel le sol a été soumis (Tessier 1984). En fait, Tessier (1984) a montré que les particules et les pores des Smectites calciques ne retrouvent pas leur taille initiale après un cycle de dessiccation et réhumidification bien que la distance interfoliaire reste identique avant et après ce cycle. En outre, en travaillant sur des sols argileux naturels (gonflants et non gonflants) du bassin de Paris, Vayssade (1978) et Parcevaux (1980) ont montré qu'au cours de l'humidification sous faible contrainte verticale (50 kPa), le gonflement macroscopique entraîne un écartement des agrégats, et ouvre ainsi les seuils de la macroporosité. Cependant, Vayssade (1978) a indiqué que le gonflement s'exprime aussi par une diminution de la porosité intra-agrégat (rayon de seuil $< 0,15 \mu\text{m}$) tandis que Parcevaux (1980) a noté que la porosité intra-agrégat n'est pas ou quasiment pas affectée au cours de gonflement mais qu'un processus de division des agrégats peut se produire lors de l'humidification. Par l'observation au MEB de la microstructure des Argiles Vertes de Romainville et des Marnes Bleues d'Argenteuil au cours du gonflement libre, Yigzaw (2009) a montré que la microstructure de l'Argile Verte de Romainville évolue en une microstructure en agrégats séparés par des pores bidimensionnels tandis que la modification de la microstructure de la Marne Bleue d'Argenteuil est moins importante à cause d'un réseau de calcite très dense. En utilisant la diffraction RX, pour une Smectite MX80 compactée, Saiyouri et al (1998) montrent que pendant l'hydratation (ou la diminution de la succion à laquelle est soumise l'échantillon), la distance entre les feuillets élémentaires augmente par adsorption progressive de couches d'eau. Dans cette étude, l'hydratation intraparticulaire passe de une à deux couches d'eau dans la gamme de succion inférieure à 50 MPa, à partir de 7 MPa elle est de 3 couches et atteint 4 couches dans le cas d'une succion quasi nulle. Dans le même temps les particules d'argile composées initialement de 350 feuillets se divisent et leur épaisseur passe à une dizaine de feuillets, augmentant ainsi de façon considérable l'espace interparticulaire accessible à l'eau.

Les études expérimentales dans la bibliographie ont permis de montrer que les déformations en cours d'humidification ou de dessiccation résultent de mécanismes multiples qui prennent leur source dans la nature et l'organisation des particules (microstructure) dans le sol, particulièrement celles des particules argileuses. Cette microstructure qui contrôle l'accès des molécules d'eau dipolaires aux sites d'adsorption des minéraux argileux, résulte en grande partie de l'état initial (teneur en eau et masse volumique sèche), de l'état de contrainte, de la nature de la fraction argileuse des sols. La microstructure semble donc être un élément clef dans les processus de retrait-gonflement mais son rôle exact sur les phénomènes de retrait-gonflement reste mal compris. Ainsi, les travaux dans ce mémoire de thèse sont réalisés dans le but d'apporter une contribution à cette question en considérant plus particulièrement le rôle des microstructures dans les processus de retrait-gonflement de deux formations géologiques sensibles à ce phénomène : les Argiles Plastiques du Sparnacien et l'argile d'Héricourt du Lias. Différents états (naturels, remaniés, compactés et après traitement à la chaux) et deux

échelles : l'échelle de l'éprouvette et l'échelle d'une chambre environnementale sont considérés.

Pour ce faire, une première partie du travail est consacrée à la caractérisation générale des sols étudiés pour analyser leurs propriétés minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques. La deuxième partie du travail concerne l'analyse des processus de gonflement, de retrait, de fissuration des sols au cours d'un cycle simple ou de cycles répétés d'humidification-séchage à l'échelle de l'éprouvette. Le processus de retrait-gonflement des sols à une échelle plus grande est étudié dans la troisième partie en réalisant des essais d'infiltration et d'évaporation dans une chambre environnementale.

Ces trois grandes parties sont présentées en six chapitres :

Le chapitre 1 présente la première partie du travail, avec les analyses minéralogiques et géotechniques des sols étudiés et une estimation qualitative de leur potentiel de retrait-gonflement. En plus, les analyses hydriques et microstructurales de ces sols sont aussi réalisées dans ce chapitre pour relier ces propriétés à celles de retrait-gonflement. Les microstructures sont étudiées grâce aux techniques de mesure porosimétrique au mercure et à l'observation au microscope électronique à balayage.

La deuxième partie du travail, sur les études à l'échelle de l'éprouvette, est présentée dans les trois chapitres suivants. Le chapitre 2 présente les résultats de mesure du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement des sols étudiés. Deux types d'essai sont mis en oeuvre : essai de gonflement libre pour mesurer le potentiel de gonflement des sols à l'état naturel, remanié et compacté et essai de gonflement par deux méthodes différentes pour mesurer la pression de gonflement des sols à l'état naturel. Les modifications des microstructures des sols au cours du gonflement libre sont aussi présentées. Enfin, le modèle microstructural de Ferber (2005) est testé en exploitant les résultats obtenus sur le gonflement libre des sols étudiés. Le chapitre 3 présente les résultats de l'étude sur la fissuration des Argiles Plastiques réalisé par l'observation de surface des échantillons de ces sols au cours de la dessiccation dans le but de comprendre le processus de fissuration lors de la dessiccation de ces argiles, à l'échelle de l'éprouvette. L'effet de cycles répétés d'humidification-séchage sur le comportement des sols est étudié dans le chapitre 4. Un niveau de l'Argile Plastique, intact, et l'argile d'Héricourt compactée non-traitée et traitée à la chaux sont choisis pour analyser le gonflement libre soumis à des sollicitations hydriques cycliques. Le changement microstructural au cours de gonflements cycliques est aussi étudié dans ce chapitre.

La troisième partie du travail, à l'échelle d'une chambre environnementale, est présentée dans les chapitres 5 et 6. La chambre environnementale qui est un grand dispositif permettant d'imposer des cycles répétés d'humidification-séchage sur un grand échantillon de sol de taille 0,25 m de hauteur, 1,00 m de longueur, 0,80 m de largeur est utilisée pour étudier le comportement au retrait-gonflement du sol à grande échelle. Des paramètres du sol (succion, teneur en eau, température) et de l'air (vitesse du vent, humidité relative, température) dans la chambre sont suivis au cours des essais d'infiltration et d'évaporation grâce à plusieurs types de capteurs. Ces données permettent d'analyser le processus de gonflement, le mode d'établissement des profils hydriques dans le sol directement en rapport avec la propagation de la sécheresse (chapitre 5) et de réaliser des études approfondies sur le phénomène d'évaporation (chapitre 6). En parallèle, la microstructure du sol dans la chambre environnementale est aussi analysée après chaque phase d'humification ou de séchage pour comparaison avec la microstructure à l'échelle de l'éprouvette, en utilisant pour cela toujours les techniques de mesure porosimétrique au mercure et l'observation au microscope électronique à balayage.

Chapitre 1 - *Caractéristiques minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques des sols étudiés*

1. Introduction

Les propriétés de retrait-gonflement des sols argileux sont liées à leurs propriétés mécaniques et hydrauliques qui sont contrôlées à la fois par leur minéralogie, les interactions eau-argile et l'arrangement microstructural. L'étude de la minéralogie et de la microstructure des sols argileux est donc primordiale. Outre ces deux propriétés intrinsèques du sol, la minéralogie et la microstructure, les paramètres géotechniques et hydriques peuvent également permettre de caractériser le gonflement des sols qui sont sensibles à ce phénomène. En fait, ces paramètres permettent de donner une estimation qualitative de leur potentiel de retrait-gonflement. Les caractérisations géotechniques et hydriques sont donc également nécessaires à réaliser pour ce type de sol.

Deux sols argileux, étudiés dans ce mémoire de thèse, sont d'abord présentés. Les résultats de l'analyse minéralogique de ces sols en utilisant les rayons X sont présentés. La caractérisation microstructurale de ces sols à l'état intact en utilisant la porosimétrie au mercure et le MEB est ensuite réalisée. Les paramètres géotechniques à partir des essais géotechniques classiques sont ensuite présentés. Enfin, les caractéristiques hydriques de ces sols sont établies à partir de leur courbe de rétention d'eau.

2. Matériaux étudiés : *Argile Plastique et Argile d'Héricourt*

Deux formations argileuses du bassin de Paris sensibles aux processus de retrait-gonflement, les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil, ont été étudiées antérieurement par l'équipe de recherche dans le cadre du projet de recherche : « Aléa et risque sécheresse » soutenu par la Fondation MAIF, du projet ARGIC : « Analyse du retrait-gonflement des sols argileux et de ses incidences sur les constructions » soutenu par l'ANR et de la fiche recherche « Sécheresse géotechnique et bâti » du Réseau de recherche sur le développement durable, soutenue par la région Ile-de-France. Les travaux présentés dans cette thèse sur les Argiles Plastiques du Sparnacien dans le cadre du projet ARGIC 2 : « Sécheresse et Constructions » soutenu par le MEDDTL ont pour but d'élargir l'analyse et de comparer les 3 types d'argiles étudiés. Une autre formation, l'argile d'Héricourt du Lias, qui est aussi sensible au retrait-gonflement est étudiée également dans cette thèse, considérant de plus les effets de traitement à la chaux.

2.1. Argile Plastique

Les premiers sols étudiés dans ce mémoire de thèse sont les Argiles Plastiques (AP) du Sparnacien qui ont été prélevées à Angervilliers (Essonne, Ile-de-France) (Figure 1.1). Trois niveaux sont analysés : un niveau supérieur de couleur gris clair (APS) (2 à 4 m), un niveau moyen de couleur rouge (APM) (1 à 2 m) et un niveau inférieur de couleur gris, jaune ou blanche (API) (6 à 8 m). Ils sont différenciés par leur teneur en argiles et les proportions des différents minéraux argileux.

On fait observer que les épaisseurs données sont des moyennes à l'échelle de la carrière.

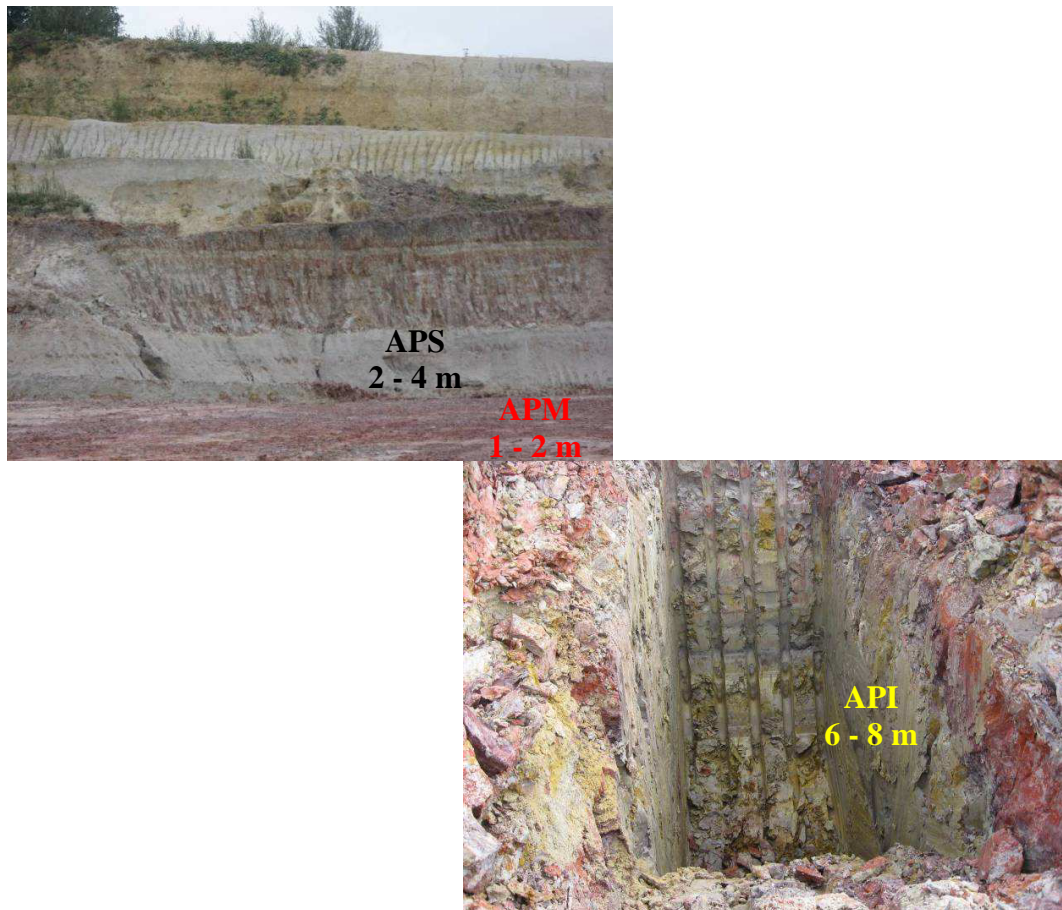


Figure 1.1 : Affleurements d'APS, APM et API

Dans cette carrière, les Argiles Plastiques du Sparnacien se présentent au sein d'une série sédimentaire comprenant, de haut en bas : les Sables et grès de Breuillet (Sparnacien), les Argiles sableuses et Argiles Plastiques (Sparnacien), et plus en profondeur les Marnes de Meudon (Montien), la Craie blanche à silex (Sénonien).

2.2. Argile d'Héricourt

Le deuxième sol étudié est l'argile d'Héricourt (AH) du Lias qui est connu comme un sol très gonflant. Les échantillons de sol ont été prélevés à Héricourt en Haute-Saône situé à l'est de la France. Ce sol est utilisé dans la construction d'un remblai dans le projet TerDOUEST « Terrassements Durables - OUvrages en Sols Traités » soutenu par le CNRS. L'état « initial naturel » correspond à un matériau prélevé sur le site du chantier et non dans la formation géologique en place.

Cette argile traitée à la chaux est aussi étudiée dans cette thèse. La chaux utilisée dans cette étude est la chaux vive.

2.3. Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil

Les échantillons d'Argiles vertes de Romainville (AVR) et de Marnes bleues d'Argenteuil (MBA) pris en considération dans ce travail ont été étudiés antérieurement dans le cadre de la thèse de Yigzaw (2009). Ils ont été prélevés dans une carrière située à environ 25 km au

Nord-Est de Paris sur les communes de Villeparisis et Le Pin (département de Seine-et-Marne) (Figure 1.2).



Figure 1.2 : Affleurements d'AVR et MBA (Yigzaw 2009)

Dans cette carrière, la série sédimentaire est la suivante, de haut en bas : Formations quaternaires, Argiles vertes de Romainville (4 à 5 m), Glaises à Cyrènes (1 à 2 m), Marnes blanches de Pantin (4 à 5 m), Marnes bleues d'Argenteuil (8 à 10 m), Haute masse de gypse (Yigzaw 2009). Les Marnes bleues d'Argenteuil (MBA) appartiennent au Ludien supérieur, étage de l'Eocène supérieur, et l'Argile verte de Romainville (AVR) appartient au Rupélien inférieur (anciennement Stampien), étage de l'Oligocène inférieur.

3. Caractérisation minéralogique

3.1. Méthode utilisée

La composition minéralogique des sols argileux étudiés dans ce mémoire de thèse est déterminée par la méthode de diffraction des rayons X. Cette méthode consiste à soumettre le matériau à un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ($0,5 < \lambda < 2 \text{ \AA}$) (échantillon argileux orienté ou non). Lorsque le rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émission de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques en phase vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. Chaque minéral ou famille argileuse sera caractérisé par une distance inter-réticulaire d suivant la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad [1.1]$$

où n : nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction

λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé

d : distance inter-réticulaire, en angströms (\AA)

θ : angle de diffraction

Les sols argileux sont constitués en proportion variable de minéraux argileux (phyllosilicates) et de minéraux non argileux. Pour déterminer les composants de ces deux groupes de minéraux, une analyse RX d'un échantillon de poudre représentatif du matériau dans sa globalité est réalisée, ainsi que sur la fraction inférieure à 2 μm correspondant aux particules argileuses. Les procédures de préparation des ces échantillons sont décrites en détail dans Moore et Reynolds (1989).

La présence des minéraux non argileux tels que le quartz, les feldspaths, les oxydes de fer, les oxydes de Ti est identifiée à partir du diffractogramme des spectres de diffraction des rayons X sur une lame de poudre du sol avec des réflexions principales respectivement à 3,3 Å, 3,25 Å, 2,71 Å et 3,51 Å. Les phyllosilicates qui correspondent aux minéraux argileux sont aussi détectés par cette analyse mais il n'y a pas possibilité de les différencier minéralogiquement, une autre analyse spécifique aux argiles doit être réalisée.

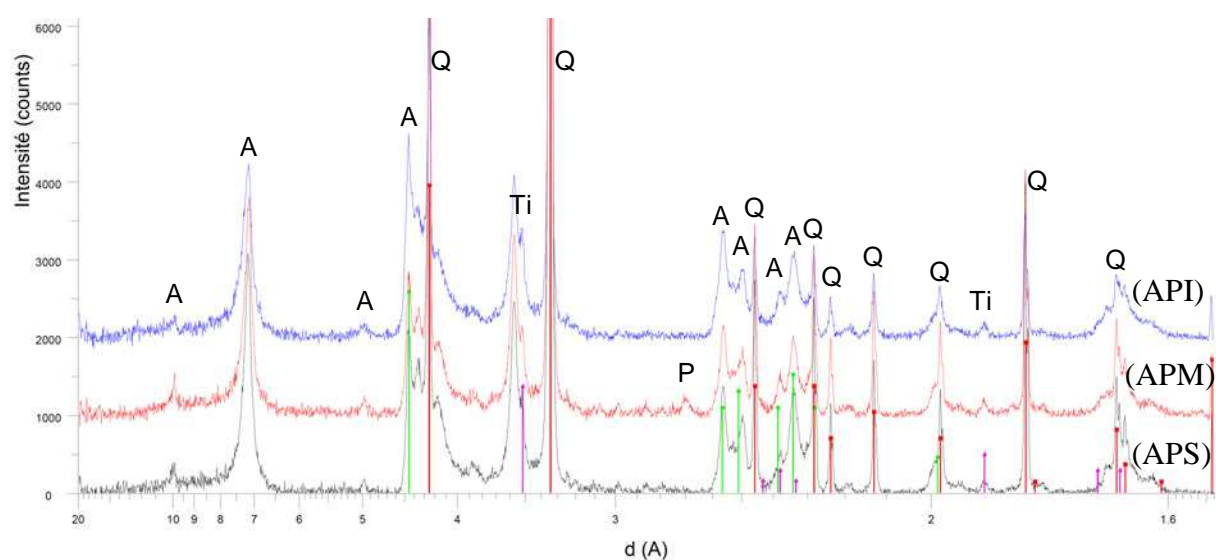
Concernant les minéraux argileux, leur présence est identifiée à partir des lames d'argiles qui sont préparées par dépôt direct d'une suspension diluée, de particules inférieures à 2 μm , sur une lame de verre dépoli, suivi d'un séchage à l'air libre. Cette suspension argileuse est préalablement décalcifiée et les lames sont préparées suivant 3 protocoles différents : séchage à l'air libre (état naturel), traitement au glycol (mise en évidence des argiles gonflantes) et chauffage (destruction de la Kaolinite).

Chaque famille de minéraux argileux présente une réflexion principale. Quatre familles de minéraux argileux sont analysées suivant leurs réflexions (Moore et Reynolds, 1989) : la première est l'Illite qui est détectée par la présence de raies à 10 Å, 5 Å et 0,34 Å correspondant aux réflexions (001), (002) et (003) d'une phase illitique non affectée par le traitement à l'éthylène-glycol et le chauffage à 550°C. La deuxième est la Kaolinite qui est mise en évidence par la présence de réflexions (001) et (002) à 7,15 Å et 3,5 Å à l'état naturel, non modifiées par le traitement à l'éthylène-glycol, mais disparaissant après un chauffage à 490°C, (déshydroxylation de la Kaolinite). La troisième est la famille des Smectites qui est diagnostiquée par la présence, dans le diffractogramme glycolé, d'une réflexion (001) développée aux environs de 17 Å, qui s'établit vers 10 Å après chauffage à 490°C, par départ de l'eau interfoliaire. La quatrième est la Chlorite qui est détectée par sa réflexion à 14 Å dans le diffractogramme naturel et/ou glycolé et peut être confirmée par la réflexion (003) à 4,7 Å dans le diffractogramme glycolé et vers 7 Å dans le diffractogramme chauffé. L'intensité de la réflexion à 14 Å peut augmenter ou diminuer lors du chauffage, en relation avec son degré de dégradation.

Pour l'argile d'Héricourt traitée à la chaux, la procédure de préparation des échantillons de poudre est modifiée avec le but de mettre en évidence la réaction entre la chaux et les minéraux argileux dans le sol. Le sol est d'abord séché à l'air libre et broyé suivant le protocole habituel (sa teneur en eau est alors égale à 8 %). La chaux vive est ajoutée (taux pondéral de 5 %). Il est ensuite ajouté une quantité d'eau (environ $w = 30\%$) pour assurer que la réaction entre la chaux et le sol se produit. Une fois le mélange bien réalisé, il est divisé en plusieurs petites quantités. Elles sont conservées à une température de l'environnement du laboratoire ($T = 22 \pm 1^\circ\text{C}$) dans un dessiccateur qui maintient une humidité de 95 % avec une circulation d'air pour faciliter la réaction entre la chaux et les minéraux dans le sol. Enfin, ces échantillons de poudre conservés dans le dessiccateur sont sortis et analysés en fonction du temps.

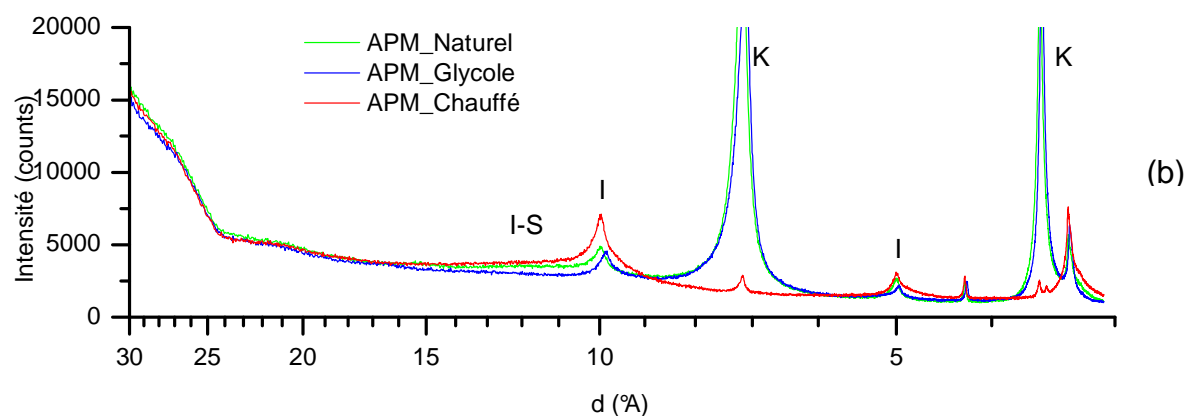
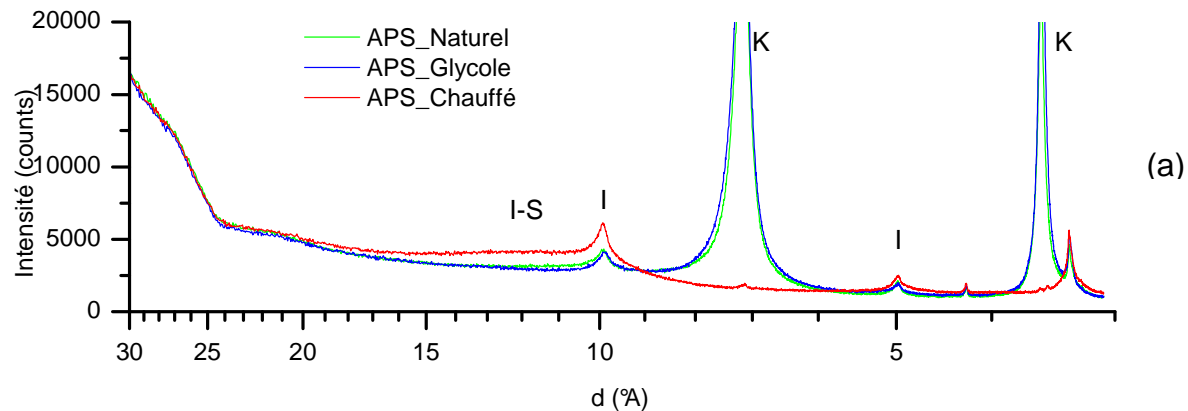
3.2. Argile Plastique

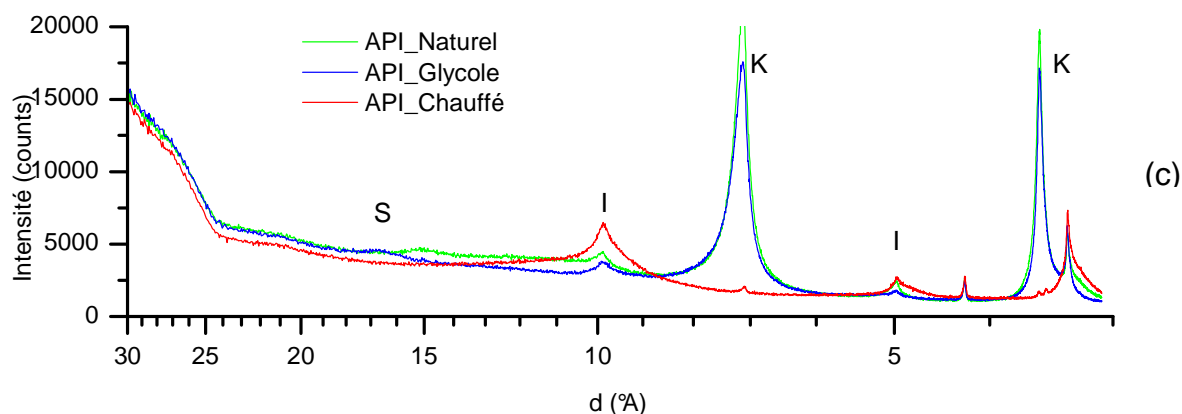
La Figure 1.3 et la Figure 1.4 présentent les diffractogrammes obtenus sur la lame de poudre et sur les lames d'argiles des trois niveaux de l'Argile Plastique. Le traitement des spectres dans ces Figures permet d'identifier des minéraux argileux et non-argileux présents dans ce sol.



(Q : quartz, A : argiles, Ti : oxydes de Ti, P : pyrite)

Figure 1.3 : Diffractogrammes RX de lame de poudres d'APS, APM, API





(S : Smectite, I : Illite, K : Kaolinite)

Figure 1.4 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles : (a) : APS, (b) : APM, (c) : API

Le Tableau 1.1 résume l'importance relative des minéraux principaux présents dans les trois niveaux de l'Argile Plastique (APS, APM, API) comparée aux deux formations Argiles Vertes de Romainville (AVR) et Marnes bleues d'Argenteuil (MBA). On note que l'abondance relative de chaque minéral identifié est estimée semi-quantitativement en tenant compte de la hauteur et de la forme de ses pics dans le diffractogramme (Fagel 2008).

Tableau 1.1 : Caractérisation minéralogique des trois niveaux d'AP, de AVR et de MBA

(++++ : très abondant, +++ : abondant, ++ : moyennement abondant, + : peu abondant, - : non décelé ou traces)

Composition minéralogique déterminée sur matériau total (lames de poudres ou mesures spécifiques)	APS	APM	API	<i>E-AVR-0*</i>	<i>E-MBA-01*</i>	<i>E-MBA-0*</i>
Carbonates	0%	0%	0%	10-18%	26-54%	63%
Calcite	-	-	-	-	+++	++++
Dolomite	-	-	-	++	-	-
Quartz	37 %	34 %	19 %	30-40%	23%	<15%
Oxydes de Ti	+	+	+	-	-	-
Oxydes de fer	-	+	-	-	-	-
Feldspaths	-	-	-	<5%	-	-
Minéraux argileux	62 %	61 %	79 %	30-50%	40-60%	20-40%
Minéraux argileux déterminés sur <2µm (lames d'argiles)						
Illite	+	+	++	+++	+++	++
Kaolinite	+++	+++	++	++	+	-
Interstratifiés Illite-Smectite ou Smectites	+	+	++	++	+++	++
Argiles fibreuses	-	-	-	-	-	++

(* : Yigzaw 2009)

Il faut noter que la teneur en carbonates des échantillons dans le tableau ci-dessus est mesurée par calcimétrie à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling (Norme NF P94-048).

L'analyse des résultats concernant les trois niveaux d'Argiles Plastiques (AP) conduit aux conclusions suivantes :

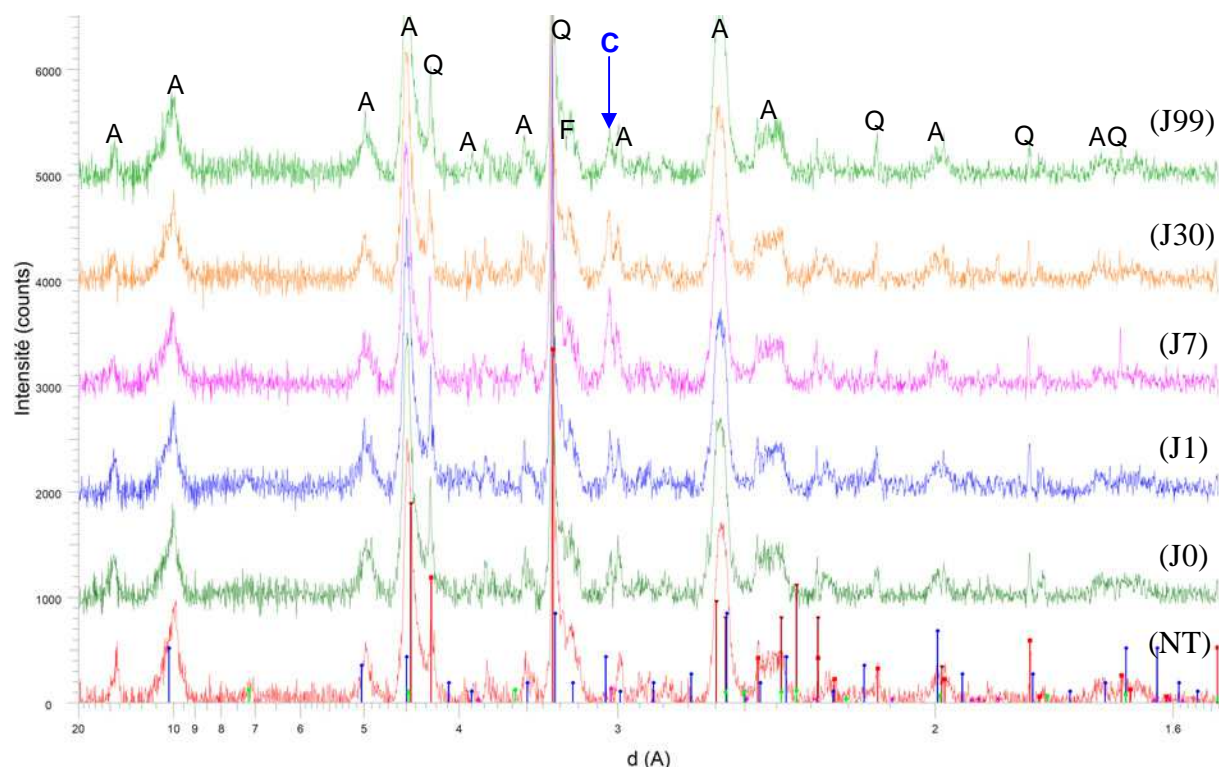
- Les compositions minéralogiques des trois niveaux d'AP sont très proches ;
- La proportion de quartz diminue avec la profondeur. Elle est de 37 % pour APS, de 34 % pour APM et de 19 % pour API ;
- Les trois niveaux sont non carbonatés ;
- Les minéraux argileux sont représentés par de la Kaolinite, de l'Illite et des interstratifiés Illite-Smectite en proportions égales dans API, alors que la Kaolinite est majoritaire dans APS et APM.

La comparaison avec les Argiles vertes de Romainville (AVR) et les Marnes bleues d'Argenteuil (MBA) met en évidence des différences majeures avec ces formations :

- Absence de carbonates dans AP alors qu'ils sont abondants à très abondants dans AVR et MBA ;
- Abondance de Kaolinite dans APS et APM par rapport aux autres formations ;
- Proportion d'interstratifiés Illite-Smectite moins importante dans APS et APM.

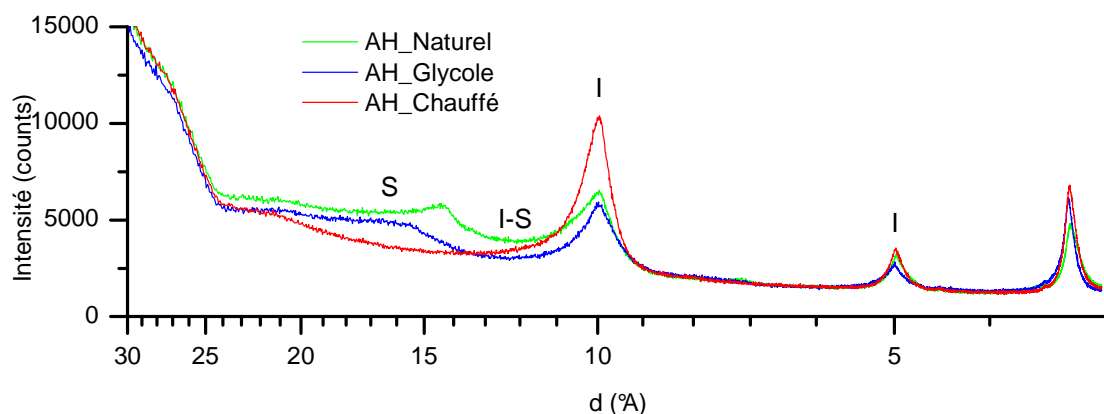
3.3. Argile d'Héricourt

La Figure 1.5 et la Figure 1.6 présentent les diffractogrammes obtenus sur la lame de poudre et sur les lames d'argiles de l'argile d'Héricourt non-traitée (AH) et traitée à la chaux. On note que pour étudier la minéralogie du sol traité à la chaux, l'analyse RX sur les lames d'argiles de ce sol n'est pas effectuée, seules les analyses RX sur des échantillons de poudre après différentes durées de traitement sont réalisées.



(Q : quartz, A : argiles, F : feldspaths, C : calcite ou CSH)

Figure 1.5 : Diffractogrammes RX de lame de poudres de AH non-traité (NT) et traité à la chaux (après 0 jour : (J0), après 1 jour (J1) après 7 jours (J7), après 30 jours (J30), après 99 jours (J99))



(S : Smectite, I : Illite, K : Kaolinite)

Figure 1.6 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles de AH

Le Tableau 1.2 résume l'importance relative des minéraux principaux présents dans l'argile d'Héricourt.

Tableau 1.2 : Caractérisation minéralogique de AH

(+++ : très abondant, ++ : abondant, + : peu abondant, - : non décelé)

Composition minéralogique déterminée sur matériau total (lames de poudres)	AH
Quartz	10%
Feldspaths	5%
Minéraux argileux	85%
Minéraux argileux déterminés sur <2µm (lames d'argiles)	
Illite	+++
Kaolinite	-
Smectite et Interstratifiés Illite-Smectite	++

Il faut noter que la teneur en carbonates est aussi mesurée par calcimétrie à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling mais ils n'ont pas été décelés dans l'échantillon d'argile d'Héricourt naturel.

L'analyse des résultats concernant l'argile d'Héricourt non-traitée et traitée à la chaux à différents temps de cure conduit aux conclusions suivantes :

- Les minéraux non argileux dans l'argile d'Héricourt sont représentés par du quartz et des feldspaths. Le quartz est présent dans le sol en quantité significative.
- Quant aux minéraux argileux, deux minéraux sont présents : l'Illite et les Smectites, soit sous forme distincte soit en interstratifiés Illite-Smectite. La Kaolinite n'est pas présente dans le sol.
- L'ajout de la chaux vive fait apparaître la calcite dans l'analyse RX de l'échantillon de sol traité dès le premier jour et après 7 jours, 30 jours et 99 jours de traitement. En effet,

une nouvelle réflexion correspondant à la calcite est visible à 3,03 Å dans les diffractogrammes des échantillons de sol traité après 1 jour, 7 jours, 30 jours et 99 jours (Figure 1.5). Bell (1996) et Le Runigo (2008) ont montré aussi la formation de calcite lors du traitement des sols à la chaux. Celle-ci résulte de la carbonatation de la chaux avec le dioxyde de carbone de l'air. Cependant, il faut noter que cette réflexion correspond également à celle du silicate de calcium hydraté (CSH) qui est un minéral formé après la réaction entre la chaux et les minéraux argileux (Le Roux 1969, Maubec 2010).

4. Caractérisation microstructurale

Récemment, de nombreux chercheurs qui étudient des argiles à l'état naturel ainsi qu'à l'état compacté ont réalisé des études microstructurales cherchant à préciser par les techniques de microscope électronique à balayage et porosimétrie au mercure l'arrangement des particules, des agrégats et la distribution des rayons de pores (Delage et Lefebvre 1984 ; Delage et al. 1996 ; Pusch et Yong 2003 ; Cuisinier et Masrouri 2005 ; Nowamooz et Masrouri 2010). Ces études sur la microstructure du sol peuvent expliquer en partie leur comportement macroscopique et leurs propriétés physiques, comme cela a été montré dans la synthèse de Romero et Simms (2008).

Barden (1973), Collins et al. (1973), Tovey (1973) ont été parmi les premiers à travailler sur la microstructure des argiles gonflantes. Depuis lors, beaucoup d'études sur la microstructure des sols ont été réalisées (Romero et Simms 2008). Dans les études microstructurales des sols non saturés, plus d'attention a été portée aux sols compactés (Ahmed et al. 1974 ; Tessier et al. 1992 ; Delage et al. 1996 ; Cui et al. 2002 ; Cuisinier et Laloui 2004) qu'aux sols intacts ou remaniés (Sides et Barden 1971 ; Pusch et Schomburg 1999 ; Djéran-Maigre et al. 1998 ; Onitsuka et al. 1998). Il y a eu des tentatives pour relier la microstructure des sols compactés à leurs propriétés géotechniques. Par exemple, les caractéristiques de microstructure des sols compactés ont été utilisées pour expliquer les variations de volume dues à la compression oedométrique ou dues à des compactages dynamiques (Ahmed et al. 1974) ou pour prévoir les propriétés de rétention d'eau (Romero et al. 1999 ; Simms et Yanful 2002 ; Cui et al. 2002 ; Cuisinier et Laloui 2004). En outre, les relations entre les caractéristiques de microstructure et les propriétés principales d'un sol compacté telles que la résistance, la compressibilité et la perméabilité ont également été étudiées dans les travaux de Tessier et al. (1992) et Delage et al. (1996). Récemment, les argiles gonflantes naturelles ont été étudiées à nouveau en raison de la prise en compte croissante du risque de sécheresse dans le dimensionnement des fondations sur sols argileux (Nowamooz 2007 ; Audiguier et al. 2008 ; Yigzaw 2009).

Ce chapitre a pour but de caractériser la microstructure des sols étudiés en utilisant les techniques de porosimétrie au mercure et de microscope électronique à balayage (MEB), tout en cherchant à relier des caractéristiques de microstructure à des paramètres géotechniques et des propriétés mécaniques présentées dans les chapitres suivants. L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) donne une image de la morphologie du sol avec : l'arrangement des grains, le litage, la porosité à différentes échelles. La porosimétrie au mercure donne les courbes porosimétriques qui sont utilisées pour quantifier des paramètres géométriques du sol tels que : la taille des rayons d'accès de pores et le volume poreux accessible au mercure.

Dans cette thèse, les différents niveaux de microstructure argileuse observés et les terminologies utilisées correspondent aux descriptions de Parcevaux (1980) résumées comme suit :

- particule élémentaire : empilement d'un certain nombre de feuillets, constituant la plus petite unité visible au MEB ;
- agrégat primaire : assemblage de particules constituant l'unité morphologique homogène à l'échelle de l'observation d'un état de référence : l'état initial (naturel, remanié ou compacté) ;
- agrégat secondaire : unité morphologique provenant de l'évolution d'un agrégat primaire soit par division (dans ce cas l'agrégat secondaire est plus petit que l'agrégat primaire) soit par agglomération (dans ce cas l'agrégat secondaire est plus gros que l'agrégat primaire).

En outre, les différents types de pores observés dans cette étude sont classés en fonction de leur taille :

- $0,001 \mu\text{m} < r < 0,0025 \mu\text{m}$: pores interfeuillets ou intraparticulaires : espaces entre les feuillets à l'intérieur des particules argileuses ;
- $0,0025 \mu\text{m} < r < 0,15 \mu\text{m}$: pores interparticulaires ou intra-agrégats : vides entre les particules argileuses à l'intérieur des agrégats ;
- $0,15 \mu\text{m} < r < 4 \mu\text{m}$: pores inter-agrégats : vides entre les agrégats naturels constitués de particules argileuses naturelles. Dans la suite du mémoire, suivant le contexte, ces pores inter-agrégats sont nommés soit, pores inter-agrégats, soit pores inter-agrégats naturels ;
- $r > 4 \mu\text{m}$: pores inter-agrégats artificiels : vides entre les agrégats artificiels constitués de particules argileuses compactées. Dans la suite du mémoire, ces pores inter-agrégats sont nommés soit, pores inter-agrégats artificiels, soit pores inter-agrégats compactés.

4.1. Méthodes utilisées

Les protocoles des deux techniques utilisées dans ce mémoire de thèse pour étudier la microstructure des sols, la porosimétrie au mercure et le microscope électronique à balayage (MEB), sont décrits en détail dans les paragraphes suivants.

4.1.1. Observation par microscope électronique à balayage (MEB)

Les échantillons utilisés pour l'analyse microstructurale par MEB sont préparés préalablement suivant la méthode de la lyophilisation. Cette méthode permet de conserver la microstructure initiale des échantillons lors de la déshydratation (Delage 1979). D'abord, les échantillons sont taillés en forme parallélépipédique de quelques millimètres de long ($< 10 \text{ mm}$) sur 1 mm de côté. Ensuite, ils sont congelés rapidement dans l'azote liquide (-196°C). Puis, ils sont cassés en deux fragments pour obtenir des surfaces observables de quelques mm^2 de section. Enfin, ils sont placés dans un lyophilisateur sous un vide inférieur à $0,05 \text{ mm Hg}$ pour faire sublimer toute la glace du sol. La durée de la lyophilisation est au moins de 48h. Grâce aux micro-cristaux de glace, lors de la fracturation après congélation les particules sont maintenues en place, évitant ainsi les phénomènes d'arrachement et de déplacement au cours de la rupture, évitant aussi que le plan de fracture corresponde à un plan de faiblesse de la structure, mais traverse bien les différents niveaux d'organisation (Delage et Pellerin 1984).

Les observations au MEB des échantillons de sols étudiés dans cette thèse ont été réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage de type JEOL JSM-840A.

4.1.2. Porosimétrie au mercure

Les échantillons utilisés dans l'analyse porosimétrique au mercure sont lyophilisés préalablement suivant la même méthode de préparation qu'au MEB. Cette méthode est basée sur le fait que le mercure est un liquide non-mouillant (Diamond 1970 ; Pellerin 1979). Pour faire pénétrer le mercure dans un milieu poreux, il est nécessaire de lui appliquer une pression. Cette pression est d'autant plus forte que la dimension des pores est plus petite. Si les pores sont assimilés à une succession d'étranglements et d'évasements de section circulaire, leur rayon d'entrée envahi par le mercure est calculé en utilisant la relation de Washburn :

$$r = \frac{2\gamma \cos \theta}{P} \quad [1.2]$$

où P : la pression d'intrusion de mercure

γ : la tension interfaciale du mercure (484×10^{-3} N/m)

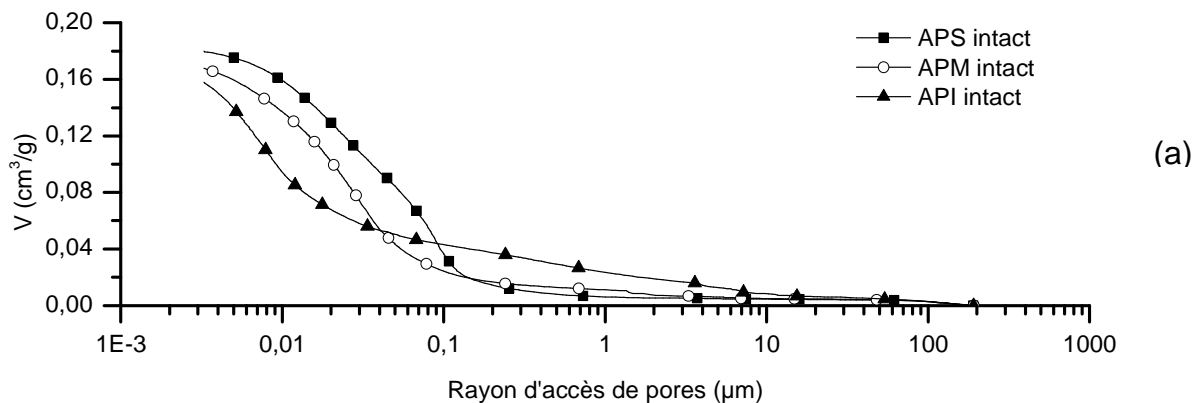
θ : l'angle de contact mercure/solide (140°)

r : le rayon d'accès des pores

L'analyse porosimétrique au mercure des échantillons de sols étudiés dans cette thèse est réalisée à l'aide d'un appareil Micromeritics AutoPore IV 9500 qui permet d'appliquer des pressions jusqu'à 228 MPa et d'analyser ainsi des tailles d'accès de pores de 3 nm à 180 μm de rayon. Le résultat obtenu est la courbe porosimétrique qui donne la relation entre le volume poreux pénétré et le rayon d'accès des pores, et donc la distribution des rayons d'accès au milieu poreux. Il est important de signaler que le porosimètre au mercure ne mesure pas la vraie dimension des pores, mais leurs rayons d'accès.

4.2. Argile Plastique

Les résultats des essais porosimétriques des trois niveaux d'Argile Plastique sont présentés en Figure 1.7.



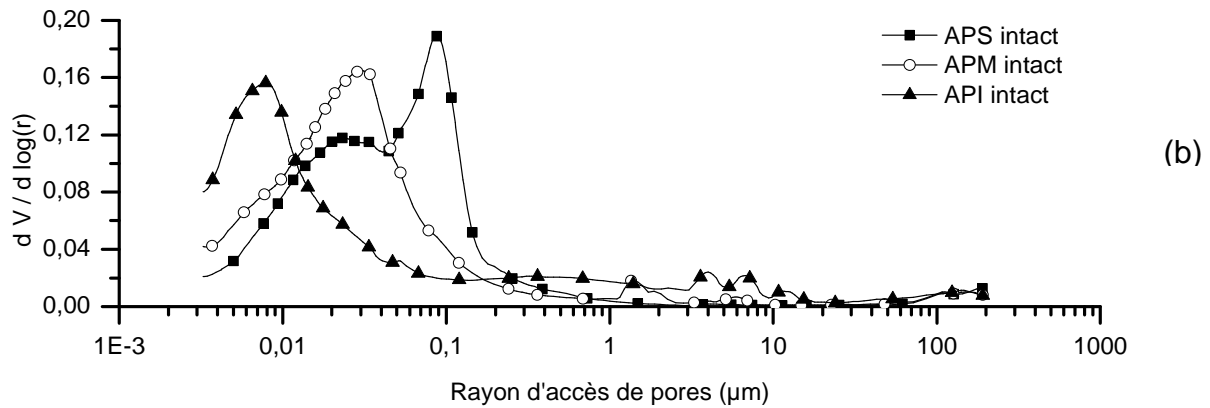


Figure 1.7 : Courbes porosimétriques de APS, APM, API

La Figure 1.7a montre que les volumes poreux cumulés des trois échantillons APS, APM et API à l'état intact sont proches : $0,18 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour APS, $0,17 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour APM et $0,16 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour API. Il faut noter que la teneur en eau de ces trois échantillons est proche aussi : 20 % pour APS et APM, 21 % pour API.

Les courbes de distribution des rayons de pores dans la Figure 1.7b montre que, à l'état intact, APS présente une distribution bimodale avec deux familles de pores intra-agrégat. API présente une distribution bimodale avec deux familles de pores dont une intra-agrégat et une inter-agrégats. APM présente une distribution unimodale avec une seule famille de pores intra-agrégat qui est caractéristique d'une structure matricielle argileuse dans laquelle l'architecture en agrégats n'apparaît pas (Audiguier et Delage 1987). Pour l'échantillon APS, les deux familles de pores observées sont intra-agrégat : une famille de pores centrée vers $0,025 \mu\text{m}$ et une autre centrée vers $0,09 \mu\text{m}$. Pour l'échantillon APM, une famille de pores intra-agrégat centrée vers $0,03 \mu\text{m}$ a été observée. Pour l'échantillon API, deux familles de pores ont été observées : une famille de pores intra-agrégat centrée vers $0,007 \mu\text{m}$ et une famille de pores inter-agrégats centrée vers $0,4 \mu\text{m}$.

Par comparaison avec AVR et MBA, la microstructure de AP est très différente de celle de AVR et MBA. Les deux formations AVR et MBA ont une distribution unimodale avec une famille de pores intra-agrégat centrée vers $0,06 \mu\text{m}$ (Yigzaw 2009).

Les observations au microscope électronique à balayage illustrent les résultats obtenus en porosimétrie au mercure. Les photos prises sur APS, à l'état intact, montrent une microstructure relativement aérée formée par des petits grains (environ $1 \mu\text{m}$) de quartz jointifs, assemblés en amas de $10 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$ qui contribuent à rigidifier quelque peu le squelette du matériau (Figure 1.8b). Ces amas sont reliés entre eux par des agrégats argileux (Figure 1.8a). Cette structure ressemble à la structure de MBA dans laquelle la calcite remplace le quartz (Audiguier et al. 2008 ; Yigzaw 2009). Cette microstructure subit peu de changement au cours du gonflement.

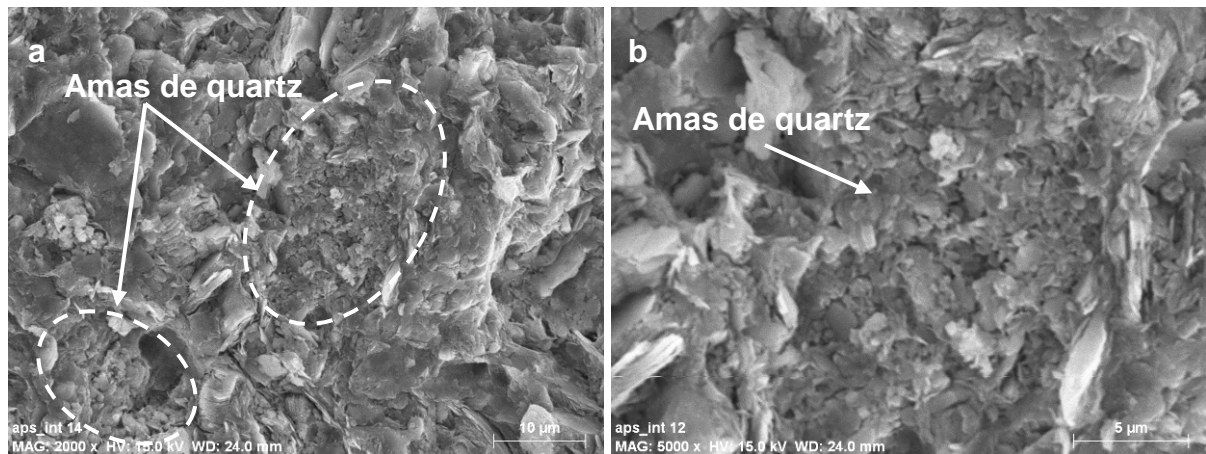


Figure 1.8 : Photos MEB de APS intact

Pour APM, à l'état intact, on observe une microstructure relativement compacte où les agrégats ne sont pas bien individualisés. Elle est formée d'une matrice argileuse dans laquelle sont noyés des grains de quartz dispersés (Figure 1.9a). Des empilements de feuillets argileux de Kaolinite ont été observés dans la Figure 1.9b.

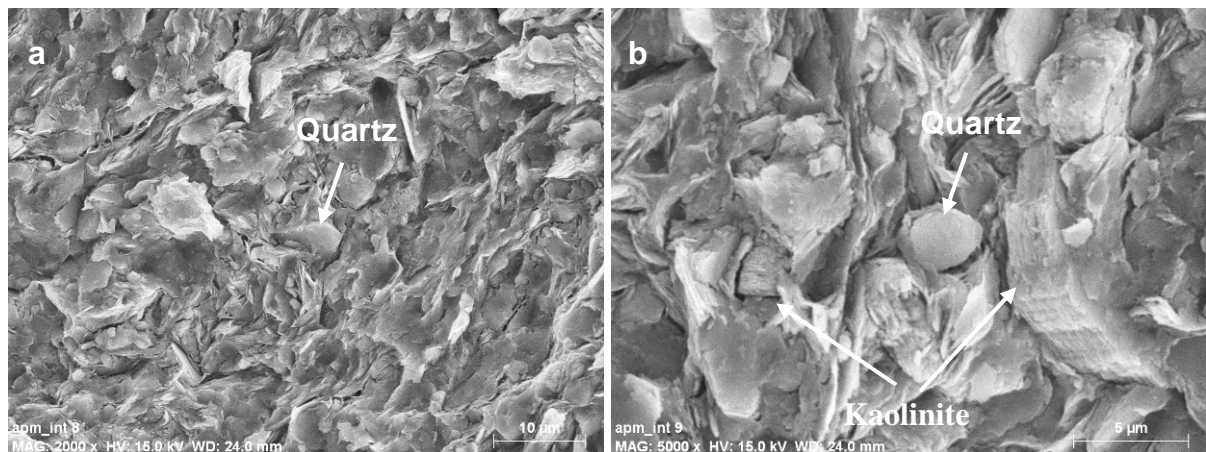


Figure 1.9 : Photos MEB de APM intact

Pour API à l'état intact, on observe une microstructure en agrégats séparés par des pores inter-agrégats de taille d'environ 1 µm (Figure 1.10a). Une matrice argileuse compacte, dans laquelle sont noyés des grains de quartz épars, est observée dans la Figure 1.10b.

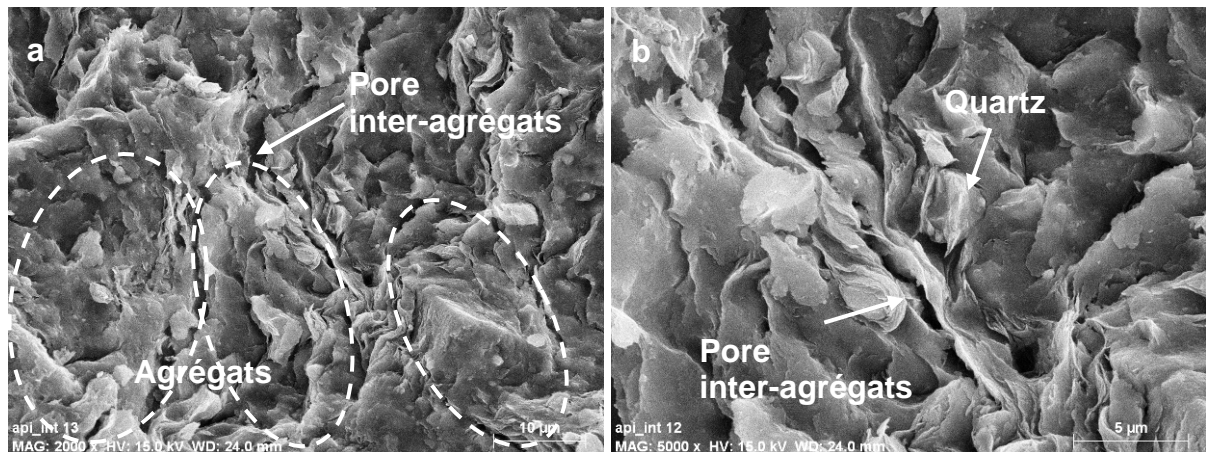


Figure 1.10 : Photos MEB de API intact

4.3. Argile d'Héricourt

Les résultats obtenus sur les essais porosimétriques de l'argile d'Héricourt à l'état naturel sont présentés sur la Figure 1.11.

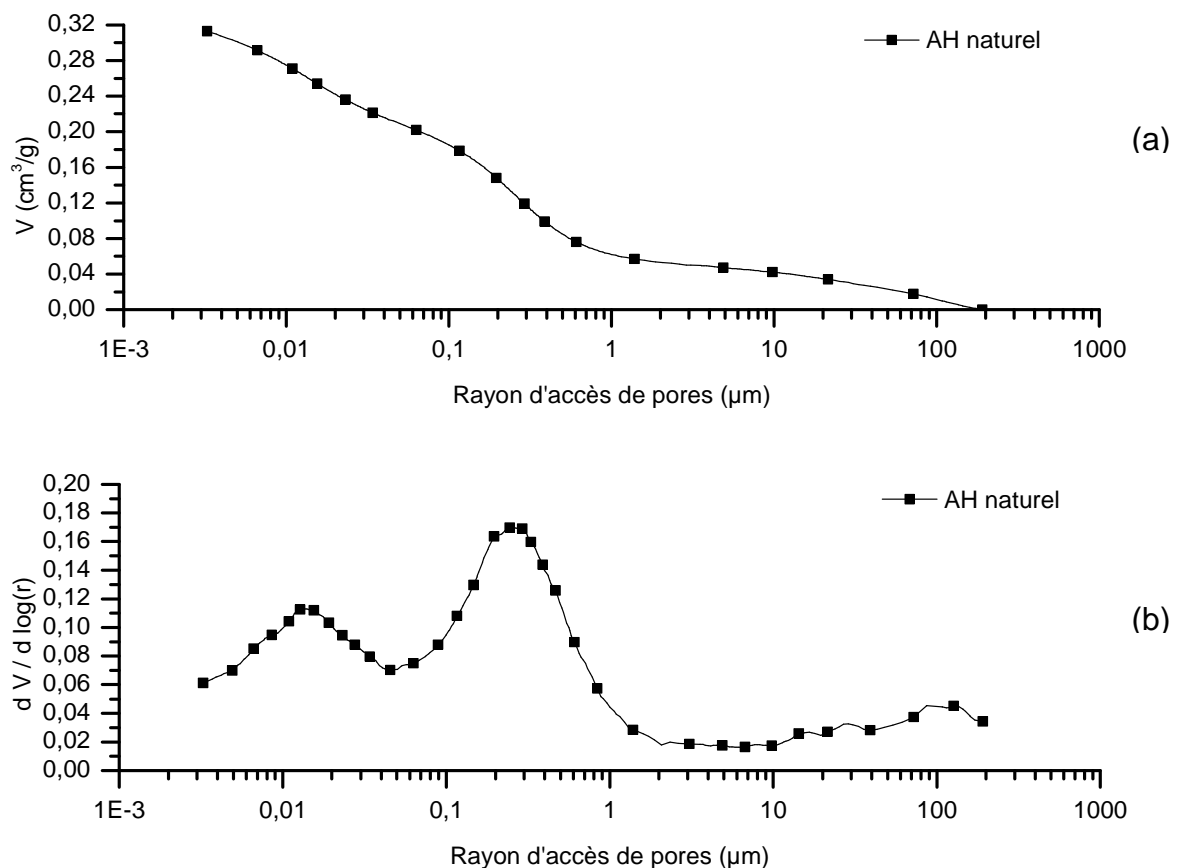


Figure 1.11 : Courbes porosimétriques de AH

La Figure 1.11a montre que le volume poreux cumulé de l'échantillon AH à l'état naturel est d'environ 0,32 cm³/g. Il faut noter que sa teneur en eau naturelle est d'environ 34 %. La courbe de distribution des rayons de pores dans la Figure 1.11b permet l'analyse de la

microstructure de ce sol. Il présente une distribution bimodale avec deux familles de pores caractéristiques d'une structure en agrégats naturels. Dans cet échantillon, deux familles de pores ont été observées : une famille de pores intra-agrégat centrée vers $0,015\ \mu\text{m}$ et une famille de pores inter-agrégats centrée vers $0,25\ \mu\text{m}$.

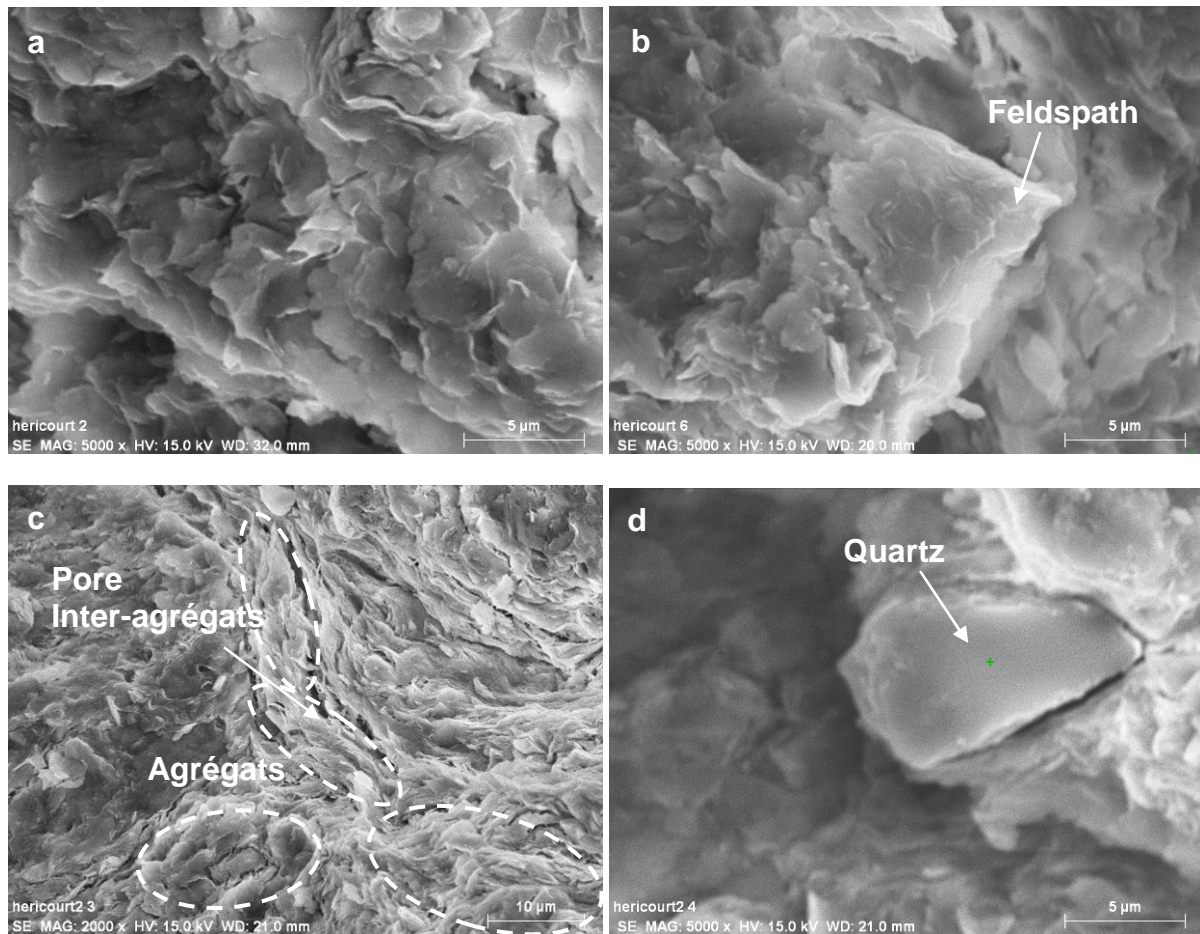


Figure 1.12 : Photos MEB de AH naturel

La Figure 1.12 présente les images prises au MEB des échantillons AH à l'état naturel, dont la teneur en eau naturelle est de 34 %. Elles montrent un aspect laminaire-turbulent caractérisé par l'assemblage de particules argileuses formées d'Illite et d'interstratifiés Illite-Smectite (Figure 1.12a). La présence de grains non argileux (feldspath, quartz) est observée par endroit (Figure 1.12b et d). Dans cet échantillon, les agrégats argileux naturels ont été observés ainsi que plusieurs pores inter-agrégats d'environ $1\ \mu\text{m}$ (Figure 1.12c). La structure des agrégats argileux naturels formés par les particules argileuses est également claire dans cette figure.

5. Caractérisation géotechnique

Dans cette partie, les paramètres géotechniques des sols étudiés seront déterminés par les essais géotechniques classiques au laboratoire. Grâce à ces paramètres géotechniques, on peut estimer le potentiel de gonflement de ces sols, en potentiel faible, moyen ou élevé. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont classé le potentiel de gonflement de sols argileux en se basant sur ces paramètres géotechniques : indice de plasticité I_P (Prian et al. 2000) ; activité de Skempton et pourcentage de la fraction argileuse (Seed et al. 1962) ; indice de retrait I_R (Ranganathan et Satyanarayana 1965) ; limite de liquidité w_L (Dakshanamurthy et Raman

1973 ; Chen 1975) ; limite de liquidité w_L et indice de plasticité I_P (Komornik et David 1969 ; Vijayvergiya et Ghazzaly 1973) ; valeur de bleu VBS (Chassagneux et al. 1996). En outre, ces paramètres géotechniques peuvent être également utilisés pour estimer le taux de gonflement et la pression de gonflement de ces sols en utilisant des modèles empiriques (Vincent et al. 2006).

Des identifications préliminaires du potentiel de gonflement des sols étudiés ont un certain intérêt. Cependant elles restent approximatives et différencient seulement les sols à fort ou faible potentiel de gonflement. En plus, on note que les différentes méthodes d'estimation du potentiel de gonflement à partir de différents paramètres géotechniques ne permettent pas d'obtenir des résultats toujours compatibles entre eux (d'après Bultel 2001). En outre, les relations sont en général déterminées à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui d'échantillons naturels. Ainsi, l'estimation du potentiel de gonflement à partir des paramètres géotechniques est utile mais ne peut pas remplacer les mesures expérimentales directes de gonflement qui seront présentées dans le chapitre suivant.

5.1. Méthodes utilisées

Les essais de caractérisation géotechnique ont été réalisés suivant les normes AFNOR. Le Tableau 1.3 regroupe les normes utilisées pour caractériser les sols étudiés.

Tableau 1.3 : Normes utilisées pour la caractérisation géotechnique

Paramètres géotechniques	Norme
Teneur en eau naturelle	AFNOR NF P 94-050
Limites d'Atterberg à la coupelle de Casagrande et au rouleau	AFNOR NF P 94-051
Masse volumique humide	AFNOR NF P 94-053
Masse volumique des particules solides	AFNOR NF P 94-054
Capacité d'adsorption de bleu de méthylène	AFNOR NF P 94-068

Pour la courbe granulométrique du sol, l'analyse sur les éléments de dimension supérieure ou égale à 40 μm est effectuée par tamisage par voie humide. L'analyse sur les particules inférieures à 40 μm est réalisée à l'aide d'un Sédigraph. Cet appareil mesure la proportion de particules sédimentées, pour une dimension donnée calculée suivant la loi de Stokes. Cette loi exprime la relation entre la vitesse de décantation d'une particule solide sphérique dans un liquide et le diamètre de cette particule. Le Sédigraph détermine au moyen d'un faisceau fin de rayons X la concentration de particules à des hauteurs décroissantes en fonction du temps.

Pour identifier les courbes de retrait, la méthode du volumètre à mercure est utilisée sur des échantillons séchés à l'air libre. A chaque valeur de teneur en eau mesurée par pesée, le volume est déterminé par le volumètre à mercure. La limite de retrait est ensuite déduite de cette courbe.

Après avoir obtenu les paramètres géotechniques principaux, d'autres paramètres sont aussi déduits suivant les formules ci-dessous :

- Indice de plasticité : $I_P = w_L - w_P$
- Indice de retrait : $I_R = w_L - w_R$
- Indice de consistance : $I_C = (w_L - w) / I_P$

- Activité de Skempton (Mitchell 1993) : $A_C = I_p / \% < 2\mu\text{m}$
- Coefficient d'argilosité (Magnan et Youssefian 1989) : $A = VBS / \% < 2\mu\text{m}$
- Indice des vides : $e = \rho_s / \rho_d - 1$
- Porosité : $n = e / (1+e)$
- Capacité d'échange cationique : $CEC(\text{meq} / 100\text{g}) = \frac{VBS(\text{g} / 100\text{g})}{374} \times 1000$
- Surface spécifique totale (Santamarina et al. 2002): $S_s(\text{m}^2 / \text{g}) = VBS(\text{g} / 100\text{g}) \frac{A_v A_{MB}}{374}$

où : A_v : nombre d'Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ atomes/mol)

A_{MB} : aire couverte par une molécule de bleu de méthylène (130 \AA^2)

5.2. Argile Plastique

Les courbes granulométriques (pour $d \geq 40 \mu\text{m}$) et sédimentométriques (pour $d < 40 \mu\text{m}$) obtenues pour les trois niveaux d'Argile Plastique sont présentées sur la Figure 1.13.

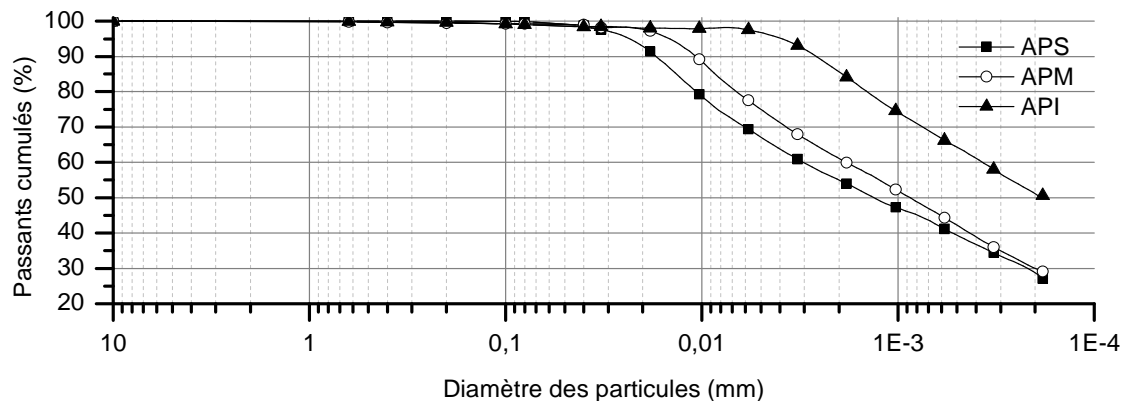


Figure 1.13 : Courbe granulométrique et sédimentométrique de APS, APM, API

L'ensemble des résultats des essais de caractérisation géotechnique obtenus est regroupé dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Caractéristiques géotechniques de AP, AVR, MBA

Caractéristiques géotechniques	APS	APM	API	E-AVR-0*	E-MBA-01*	E-MBA-0*
Teneur en eau naturelle w_{nat} (%)	20	23	20	30	29	37
Limite de liquidité, w_L (%)	45,6	63,1	69,2	75,2	96,6	86
Limite de plasticité w_p (%)	25,1	27,6	32,2	39,6	40,2	43,5
Limite de retrait w_R (%)	14,5	15,5	13	15,5	18,9	28,8
Indice de plasticité, I_P (%)	21	36	37	36	57	43
Indice de retrait, I_R (%)	31	48	56	59	78	57
Indice de consistance, I_C	1,2	1,1	1,3	1,3	1,2	1,2
Fraction fine $< 2\mu m$ (%)	56	62	87	78	81	89
Activité de Skempton A_c	0,37	0,57	0,43	0,45	0,7	0,47
Masse volumique du solide ρ_s (Mg/m ³)	2,60	2,70	2,76	2,8	2,86	2,77
Masse volumique humide ρ_h (Mg/m ³)	2,07	2,0	2,1	1,98	2,03	1,89
Masse volumique sèche ρ_d (Mg/m ³)	1,7	1,6	1,7	1,54	1,58	1,38
Indice des vides e	0,5	0,65	0,58	0,82	0,81	1
Porosité totale calculée n (%)	33	40	37	46	44	50
Valeur de bleu VBS (g/100g)	2,6	4,4	5,9	9,3	10,4	5,4
Coefficient d'argilosité A	0,05	0,07	0,07	0,12	0,13	0,06
Capacité d'échange Cationique CEC (meq/100g)	7	12	16	24,9	27,8	14,3
Surface spécifique calculée S_s (m ² /g)	54	92	123	195	218	111

(* : Yigzaw 2009)

Se basant sur la limite de plasticité w_p et la limite de liquidité w_L des sols étudiés, le diagramme de plasticité de Casagrande est présenté en Figure 1.14.

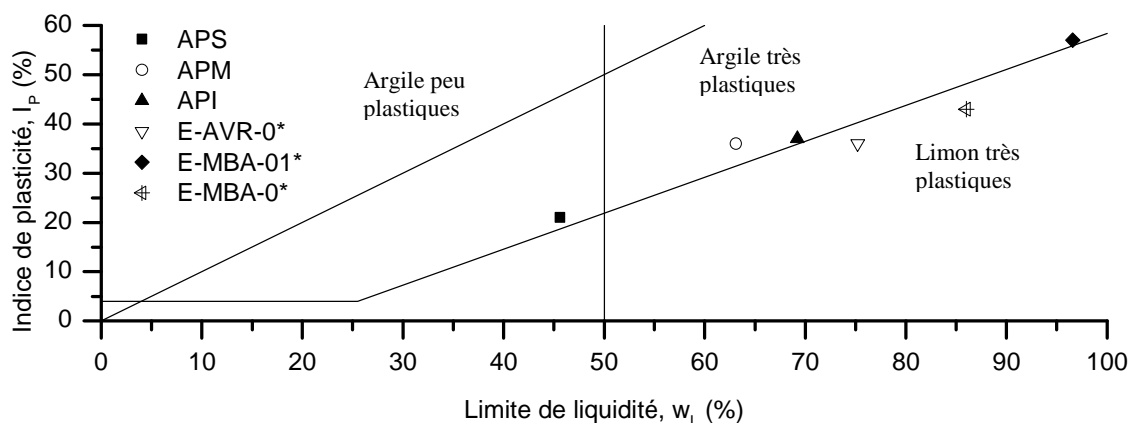


Figure 1.14 : Diagramme de plasticité de AP, AVR, MBA

Les remarques suivantes peuvent être tirées de l'analyse du Tableau 1.4 et de la Figure 1.14 :

- Pour les Argiles Plastiques (AP), l'indice de plasticité, la teneur en fines et la valeur de bleu augmentent avec la profondeur ;

- Dans APS, la présence de Kaolinite représentée par des particules pouvant atteindre 5 à 10 μm explique que le pourcentage de minéraux argileux (62 %) (Tableau 1.1) soit plus grand que le pourcentage des particules de diamètre inférieur à 2 μm (56 %).
- Dans le diagramme de plasticité de Casagrande (Figure 1.14), les deux niveaux d'Argile Plastique APM, API et AVR, MBA sont classés dans le domaine des argiles très plastiques et dans le domaine des limons très plastiques. Seul le niveau APS de l'Argile Plastique est classé dans le domaine des argiles peu plastiques. Les valeurs fortes de l'essai au bleu de méthylène (VBS) confirment la plasticité élevée de ces échantillons.
- La comparaison avec les Argiles vertes de Romainville (AVR) et les Marnes bleues d'Argenteuil (MBA) met en évidence une densité sèche plus forte pour les Argiles Plastiques (AP) et des valeurs de bleu significativement plus faibles.
- Les valeurs de l'indice de consistance I_C des trois niveaux de AP, de AVR et de MBA généralement supérieures à 1 dénotent une sensibilité au gonflement importante.
- La porosité des deux formations AVR et MBA est plus élevée que celle de AP.
- Les valeurs de bleu, les surfaces spécifiques totales et les CEC calculées de AP sont inférieures à celles de AVR et MBA. Ceci est expliqué par le pourcentage plus important des argiles à composante smectitique au sein de AVR et MBA.
- AVR et MBA présentent des indices de plasticité I_P et de retrait I_R supérieurs aux indices de AP, indiquant ainsi une aptitude au gonflement plus importante.

5.3. Argile d'Héricourt

La courbe granulométrique (pour $d \geq 40 \mu\text{m}$) et sédimentométrique (pour $d < 40 \mu\text{m}$) obtenue sur l'argile d'Héricourt est représentée sur la Figure 1.15.

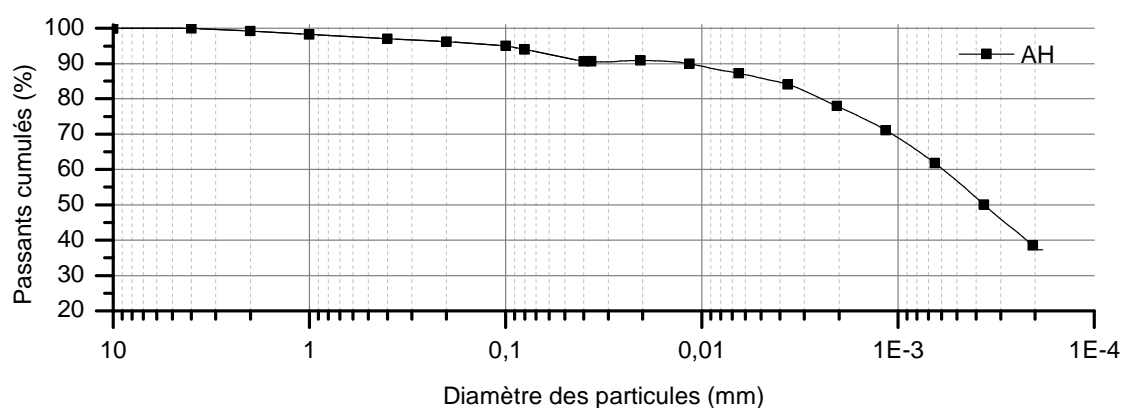


Figure 1.15 : Courbe granulométrique et sédimentométrique de AH

L'ensemble des résultats des essais de caractérisation géotechnique de l'argile d'Héricourt sont regroupés dans le Tableau 1.5. En outre, les résultats des essais de détermination des limites d'Atterberg de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux, à différentes périodes de cure (après 1 jour, 7 jours, 30 jours et 99 jours), sont aussi présentés dans ce tableau.

Tableau 1.5 : Caractéristiques géotechniques de AH

Caractéristiques géotechniques	AH	AH_j1	AH_j7	AH_j30	AH_j99
Teneur en eau naturelle w_{nat} (%)	34				
Limite de liquidité, w_L (%)	70	79	81	89	91
Limite de plasticité w_p (%)	44	56	57	62	65
Limite de retrait w_R (%)	15,5				
Indice de plasticité, I_P (%)	26	23	24	27	26
Indice de retrait, I_R (%)	55				
Indice de consistance, I_C	1,3				
Fraction fine $< 2\mu m$ (%)	78				
Indice de Skempton A_c	0,34				
Masse volumique du solide ρ_s (Mg/m ³)	2,7				
Masse volumique humide ρ_h (Mg/m ³)	1,9				
Masse volumique sèche ρ_d (Mg/m ³)	1,44				
Indice des vides e	0,9				
Porosité totale calculée n (%)	47				
Valeur de bleu VBS (g/100g)	8				
Coefficient d'argilosité A	0,1				
Capacité d'échange Cationique CEC (meq/100g)	21,4				
Surface spécifique calculée S_s (m ² /g)	167				

Se basant sur la limite de plasticité w_p et la limite de liquidité w_L de l'argile d'Héricourt non-traitée et traitée à la chaux, à différentes périodes de cure, le diagramme de plasticité Casagrande est présenté en Figure 1.16.

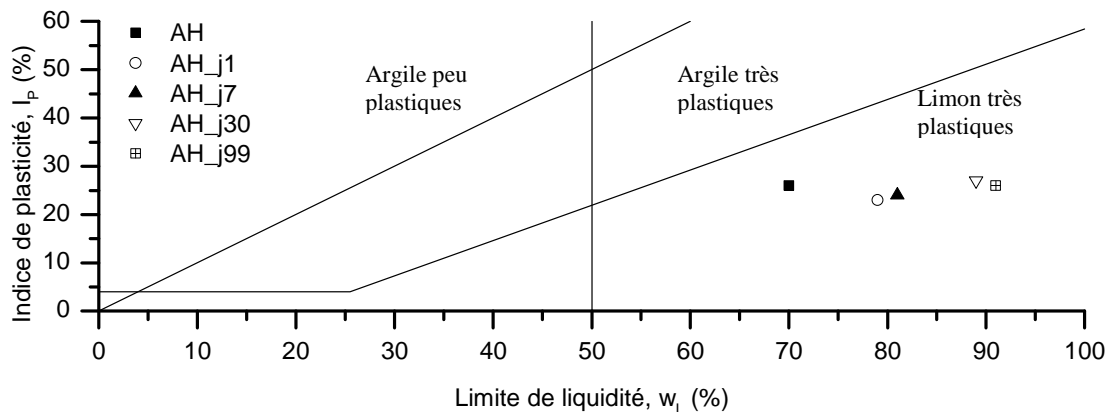


Figure 1.16 : Diagramme de plasticité de AH

Les remarques suivantes sur l'argile d'Héricourt peuvent être tirées de l'analyse du tableau 1.5 et des figures présentées :

- Dans le diagramme de plasticité de Casagrande (Figure 1.16), l'argile d'Héricourt est classée dans le domaine des limons très plastiques, avec une granulométrie à dominante argileuse (78% $< 2\mu m$). Les échantillons de sols traités à la chaux après 1 jour, 7 jours, 30 jours et 99 jours sont également classés dans le domaine des limons très plastiques.
- La valeur forte de l'essai au bleu de méthylène ($VBS = 8$) confirme la plasticité élevée du sol AH.

- La valeur de l'indice de consistance I_C supérieure à 1 dénote une sensibilité au gonflement importante.
- Les masses volumiques sèche et humide sont faibles.
- La porosité est élevée (47%).
- Pour le sol traité à la chaux, une variation importante et rapide pour la valeur de limite de liquidité w_L est observée après 1 jour de traitement. La limite de plasticité w_P augmente également après 1 jour et cette augmentation est plus importante que celle trouvée pour la limite de liquidité. Ces variations des deux limites sont à l'origine d'une réduction du domaine de plasticité I_P . Ces augmentations de limite de liquidité et de limite de plasticité continuent jusqu'à 99 jours de traitement. On note que les variations similaires de ces indices sont déjà observées dans les travaux de Le Roux (1969) sur différents types de sols argileux traités à la chaux.

6. Caractérisation hydriques

La courbe de rétention d'eau rend compte des propriétés hydriques. Elle joue un rôle fondamental dans la modélisation des sols non saturés. Cette courbe relie la teneur en eau (massique ou volumique) au potentiel de l'eau (suction) qui est exprimé souvent soit en unité de pression (Pa), soit en hauteur de colonne d'eau (cm). En se basant sur la courbe de rétention d'eau du sol, on peut en déduire son état hydrique car à chaque valeur de suction correspond une valeur de teneur en eau. Au cours du retrait-gonflement d'un sol argileux, son état hydrique change. Ainsi, l'étude de la courbe de rétention d'eau d'un sol argileux est primordiale.

Dans la bibliographie, on trouve qu'une courbe de rétention d'eau peut être obtenue par différentes méthodes en fonction de la gamme de suction appliquée. Actuellement, il existe de nombreuses techniques pour mesurer directement la suction du sol ou imposer une suction donnée sur le sol. Chaque technique n'est applicable que dans certaines conditions et il n'y a pas une technique permettant de balayer toute la gamme des valeurs de suction rencontrées dans les sols (Delage et al. 1998). Par exemple, pour mesurer la suction directement, on peut utiliser les méthodes du tensiomètre ($0 < s < 1500$ kPa), du psychromètre ($100 < s < 71000$ kPa), du papier filtre ($100 < s < 30000$ kPa) (d'après Ridley et Wray 1995). Pour imposer ou maintenir une suction prédéterminée, on peut utiliser les méthodes suivantes : la méthode osmotique ($0 < s < 6300$ kPa avec du PEG 20000 ; $0 < s < 9000$ kPa avec du PEG 6000 ; $0 < s < 12600$ kPa avec du PEG 1500) (d'après Delage et al. 1998) et la méthode de l'humidité relative contrôlée en utilisant les solutions salines saturées ($6 < s < 1000$ MPa) (d'après Cuisinier 2002).

Dans cette partie, différentes méthodes expérimentales de mesure ainsi que d'imposition d'une suction donnée sont utilisées pour étudier le comportement hydrique des sols. Pour obtenir les courbes de rétention d'eau des sols à l'état intact, trois techniques sont appliquées : la technique du papier filtre pour mesurer la suction d'échantillons intacts à l'état naturel, la technique osmotique pour imposer une suction jusqu'à 4 MPa et la technique de la pression de phase vapeur pour imposer une suction jusqu'à 305 MPa. En outre, la méthode du potentiomètre est aussi utilisée pour obtenir la courbe de rétention d'eau des échantillons de sol compacté. Les protocoles de ces méthodes sont présentés dans les paragraphes suivants.

Outre l'étude sur les courbes de rétention d'eau des sols à l'état intact, une étude approfondie sur la conductivité hydraulique de l'argile d'Héricourt compactée non-traitée et traitée à la chaux, en considérant l'effet du traitement à la chaux et de la microstructure, est aussi réalisée et présentée à la fin de cette section.

6.1. Méthodes utilisées

6.1.1. Méthode du papier-filtre

La méthode du papier-filtre est utilisée pour mesurer la succion des échantillons intacts à l'état naturel. Cette méthode consiste à insérer une triple épaisseur de papier-filtre dans l'éprouvette de sol dont on veut déterminer la succion et attendre jusqu'à l'équilibre des succions entre le sol et le papier-filtre (Parcevaux 1980).

Le papier-filtre de type Whatman n° 42 est utilisé dans cette étude. D'abord, trois papiers filtres préalablement mouillés sont introduits entre deux demi-échantillons de section carrée et de quelques centimètres de côté. Ensuite, tous sont emballés dans un film plastique et placés dans un dessiccateur hermétique. Ce dessiccateur est placé dans une salle à une température de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Une fois l'équilibre atteint (après environ 7 jours), l'échantillon est déballé et la teneur en eau du papier-filtre central est tout de suite déterminée par séchage dans l'étuve à 105°C . Une fois la teneur en eau du papier filtre mesurée, la succion matricielle correspondante est obtenue en utilisant la courbe d'étalonnage du papier filtre préalablement établie. Cette succion est égale à celle de l'échantillon (Ridley et Wray 1995).

6.1.2. Méthode osmotique

La méthode osmotique est une méthode qui utilise la technique osmotique pour imposer la succion voulue, souvent à des valeurs faibles, sur des échantillons de sol. Dans ce travail, trois paliers de succion ont été imposés : 1, 2 et 4 MPa par l'utilisation des solutions de polyéthylèneglycol de type PEG 20000 qui sont fabriquées préalablement, à une concentration connue. La succion imposée est déduite de la relation [1.3] qui a été déterminée par Williams et Shaykewich (1969) pour des succions allant jusqu'à 1,44 MPa et a été vérifiée ensuite par Delage et al. (1998) jusqu'à 12 MPa :

$$s = 11c^2 \quad [1.3]$$

où s : succion en MPa

c : concentration de solution en g PEG / g d'eau

D'abord, les solutions osmotiques de PEG 20000 sont préparées avec l'eau distillée à des concentrations correspondant à des succions voulues. On note que ces solutions sont préparées avant un jour d'utilisation pour permettre la stabilisation de la densité de la solution. Ensuite, les échantillons de sols sont coupés et entourés dans des membranes de dialyse. Enfin, ils sont immergés dans les solutions PEG 20000 et sont placés sur un agitateur magnétique, avec maintien constant de la concentration par ajustement du niveau avec de l'eau distillée si nécessaire.

Pour chaque succion choisie, après un temps d'équilibrage d'une semaine environ, les échantillons sont sortis de la solution et déballés pour déterminer la teneur en eau. Trois éprouvettes de chaque type de sol ont été testées pour chaque palier de succion.

6.1.3. Méthode de la pression en phase vapeur

Cette méthode permet d'imposer plusieurs paliers de succion, jusqu'à 305 MPa, par l'utilisation de différentes solutions salines saturées. Pour cela, les échantillons sont placés, jusqu'à l'équilibre hydrique, dans des dessiccateurs contenant à leur base des solutions salines sursaturées et agitées. Ces dessiccateurs sont fermés hermétiquement et plongés dans un bain thermostaté à $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1$ tout au long de l'essai. Les échantillons sont pesés régulièrement jusqu'à poids constant pour déterminer la teneur en eau correspondant à la succion imposée.

Dans ce travail, six solutions salines sont utilisées pour couvrir une gamme de succions de 6 MPa à 305 MPa. Le Tableau 1.6 présente les humidités relatives de ces solutions à différentes températures selon les sources citées par Delage et al. (1998). On peut trouver que la valeur de l'humidité relative pour un sel donné peut varier de manière importante suivant les auteurs. Cette différence est comprise entre 1 et 2 % pour la majorité des sels (Delage et al. 1998). L'incertitude engendrée sur la succion par 1 % d'incertitude d'humidité relative est d'environ 1,38 MPa (selon [1.4]) ce qui est très significatif pour les faibles succions (inférieures à 10 MPa). C'est-à-dire qu'au-dessous d'une succion de 10 MPa, cette méthode n'est pas précise. Mais on a utilisé un sel à 6,2 MPa de succion afin de couvrir la gamme de succion qui ne peut être imposée par la méthode osmotique. Le choix des sels sélectionnés s'est porté sur ceux qui sont les moins sensibles aux variations de température. Les succions sont déduites à partir des humidités relatives suivant la loi de Kelvin :

$$s = \frac{RT}{M(1/\rho_w)} \ln h \quad [1.4]$$

où s : succion du sol (MPa)

T : température du sol ($^{\circ}\text{K}$)

ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m^3)

h : humidité relative du sol (%)

$M = 18,016 \text{ g/mol}$; $R = 8,31432 \text{ J/mol.}^{\circ}\text{K}$

Tableau 1.6 : Solutions salines saturées utilisées

Sel	Humidité Relative (%)			Valeur retenue	
	à 20°C	à 25°C	à 30°C	HR (%) à 25°C	Succion (MPa)
$\text{CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$	98^{f} ; $95,7^{\text{d}}$		98^{p}	95,7	6,2
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	81^{f} ; $81,0^{\text{s,t}}$	80^{f} ; $81,1^{\text{s,t}}$; 81^{c} ; $79,97^{\text{m}}$	80^{f} ; $81,1^{\text{s,t}}$	81	29,5
NaNO_2	$66^{\text{f,s,t}}$	$65^{\text{f,s,t}}$	$63^{\text{f,s,t}}$	65	60,4
$\text{K}_2\text{CO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$	$44^{\text{f,s}}$	$43,2^{\text{c}}$; $43^{\text{f,s}}$; $42,76^{\text{m}}$	$43^{\text{f,s}}$	43	118,2
$\text{CaCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$	$36,5^{\text{t}}$	29^{c} ; $28,98^{\text{m}}$		29	173,5
LiCl	$12^{\text{f,s}}$	$12^{\text{f,s}}$; $11,3^{\text{c}}$; $11,05^{\text{m}}$	$12^{\text{f,s}}$	11,3	305,5

Références: m-Multon (1991) ; c-CRC handbook (1999) ; d- Delage et al. (1998) ; p -Parcevaux (1980) ; f, s, t_ respectivement NF X 15 014, Schneider (1960), Tessier (1975) (d'après Delage et al. 1998).

En outre, la variation de volume total des échantillons en fonction des paliers de succion est suivie aussi dans cet essai. Un volumètre à mercure est utilisé pour mesurer le volume total de ces échantillons une fois que l'équilibre hydrique est atteint pour tous les paliers de succion. Ce dispositif permet de calculer le volume total des échantillons à partir d'une pesée hydrostatique dans le mercure avec une précision de 5 mm^3 pour un échantillon de 10 cm^3 (Daupley 1997 ; d'après Yigzaw 2009).

6.1.4. Méthode du potentiomètre

Cette méthode est utilisée pour mesurer directement le potentiel de l'eau des échantillons d'argile d'Héricourt compactée non-traitée et traitée à la chaux. Elle permet de mesurer les succions de sol dans la gamme de 0,1 MPa à 300 MPa. Pour chaque type de sol, deux éprouvettes ont été testées.

Le potentiomètre de modèle WP4C est utilisée dans cette méthode (Decagon 2012). Elle mesure directement le potentiel hydrique du sol par la détermination de l'humidité relative de l'air au-dessus d'un échantillon dans une petite chambre fermée. Une fois l'échantillon en équilibre avec la vapeur dans cette chambre étanche du potentiomètre, on calcule l'humidité relative en utilisant la technique du miroir refroidi. Cette technique consiste à refroidir un petit miroir dans la chambre jusqu'à ce que la rosée commence tout juste à se former sur celui-ci. Au point de rosée, le potentiomètre mesure à la fois la température du miroir et celle de l'échantillon. Les lectures de températures sont ensuite converties en potentiels hydriques (ou succions).

Les échantillons de sol non-traité et traité à la chaux sont compactés directement dans des petites coupelles de 37 mm de diamètre qui sont fournies avec le potentiomètre à une densité sèche $\rho_d = 1,4 \text{ Mg/cm}^3$. Ils sont ensuite saturés par ajout d'eau. Puis, on les laisse sécher à l'air libre en mesurant les succions ou le potentiel de l'eau chaque jour jusqu'à l'équilibre hydrique.

6.2. Courbe de rétention d'eau

6.2.1. Courbe de rétention d'eau de l'Argile Plastique

Pour déterminer les courbes de rétention d'eau de l'Argile Plastique, deux méthodes : la méthode osmotique et la méthode de la pression en phase vapeur, ont été utilisées. Ces deux méthodes permettent d'imposer aux échantillons des succions comprises entre 1 et 305 MPa. En plus, la succion des échantillons à l'état naturel initial est mesurée par la méthode du papier-filtre.

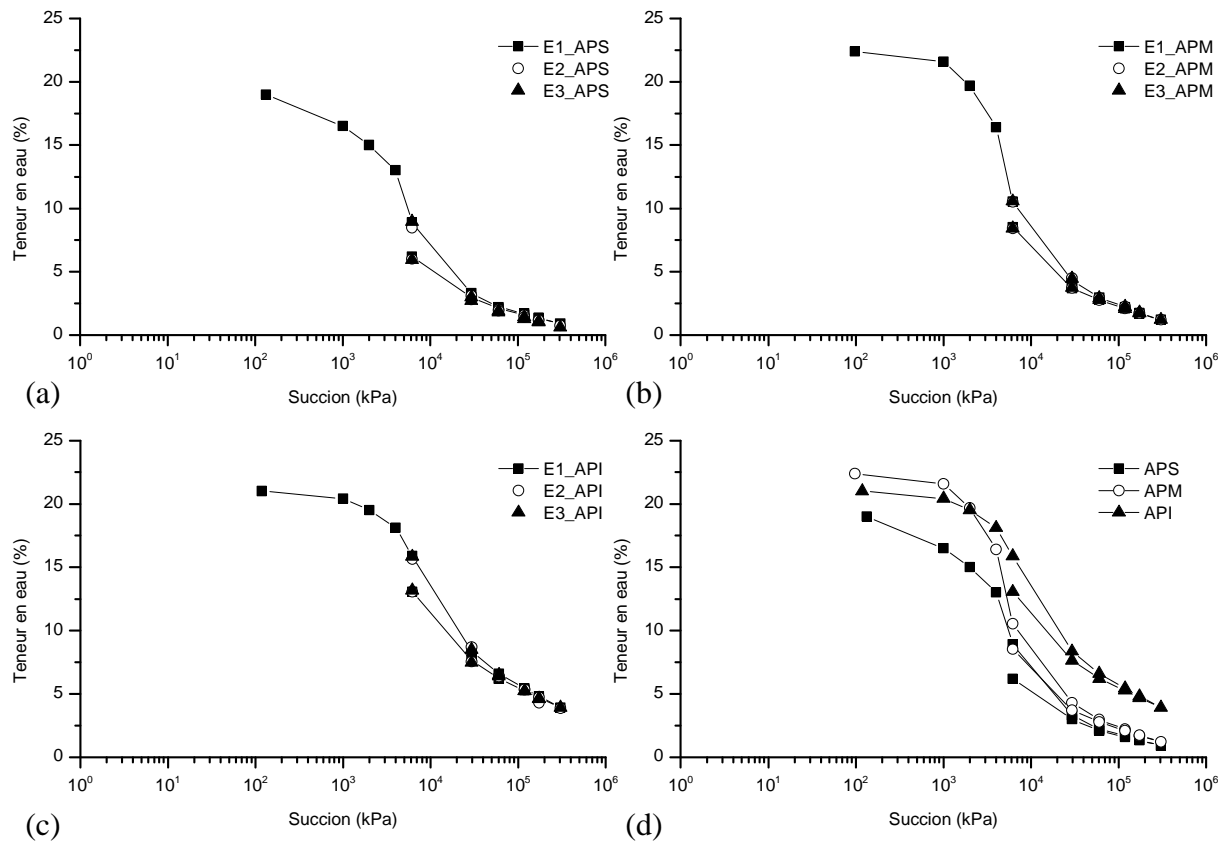


Figure 1.17 : Courbes de rétention d'eau de : (a) APS, (b) APM, (c) API, (d) APS, APM et API

Les courbes de la Figure 1.17a, b et c présentent l'évolution de la teneur en eau en fonction de la succion pour trois échantillons de APS, APM et API. Pour chaque niveau, ces courbes sont identiques pour les trois échantillons. Ils montrent alors une bonne homogénéité du matériau de chaque niveau de sol et une répétitivité des résultats. Ces courbes indiquent aussi une bonne corrélation entre les différentes valeurs obtenues par différentes méthodes d'imposition de succion (méthode osmotique et méthode en phase vapeur) et la méthode du papier-filtre. Pour les trois niveaux de sol, une quasi réversibilité est observée entre le drainage et l'humidification pour les succions supérieures à 100 MPa ; en dessous de cette valeur les chemins de drainage et d'imbibition se séparent, présentant un phénomène d'hystérésis.

La Figure 1.17d présente la comparaison entre les courbes de rétention d'eau obtenues sur les trois niveaux d'AP. Pour la courbe de rétention d'eau d'APS et d'APM, il y a une différence pour les succions inférieures à 29,5 MPa mais ces deux courbes se rapprochent et tendent à converger pour des succions supérieures à 29,5 MPa. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au début de l'essai de drainage, la teneur en eau d'APM est plus élevée et sa masse volumique sèche est plus faible. D'après Loiseau (2001) la différence, à la fois de teneur en eau et de densité sèche, entraîne une différence sur les courbes de rétention du sol, particulièrement aux faibles succions. APM retient plus d'eau aux faibles succions et montre un taux de désorption plus fort pour des succions supérieures au point d'entrée d'air qu'APS. En outre, une importante différence est observée entre les deux courbes d'APS, APM et la courbe d'API. Un décalage d'environ 3 % de teneur en eau sur tous les paliers de succion est observé entre la courbe d'API et les deux autres courbes.

Par comparaison avec les sols AVR et MBA, les chemins de drainage et d'humidification de ces deux sols sont aussi réversibles pour des succions supérieures à 100 MPa et présentent un

phénomène d'hystérésis pour des succions plus faibles. Dans la gamme de succion supérieure à 100 MPa, l'eau est adsorbée par les particules argileuses et le processus de séchage/humidification est réversible (Yigzaw 2009). En outre, l'influence des conditions initiales comme la teneur en eau et la masse volumique sèche initiales sur les courbes de rétention d'eau est aussi observée sur ces deux sols.

L'imposition des différents paliers de succion à un échantillon de sol cause la variation de son volume et la variation de sa teneur en eau, ou encore de son indice des vides. L'évolution de l'état du matériau au travers de ces paramètres est présentée sur les Figure 1.18 (APS), Figure 1.19 (APM) et Figure 1.20 (API). Il faut noter que ces courbes de retrait sont obtenues à partir d'une série de trois échantillons réservés pour la mesure de volume, différente de la série d'échantillons réservés pour la mesure de la teneur en eau dans les essais par la méthode en phase vapeur.

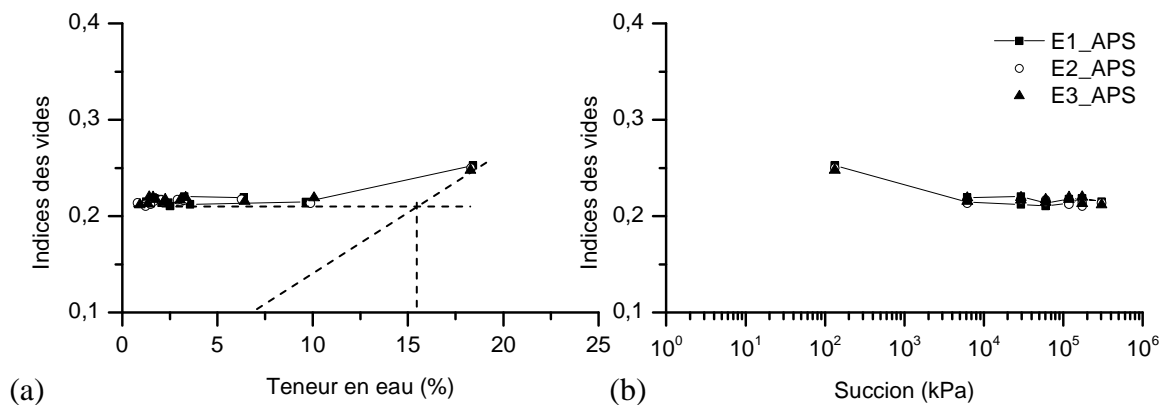


Figure 1.18 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de APS

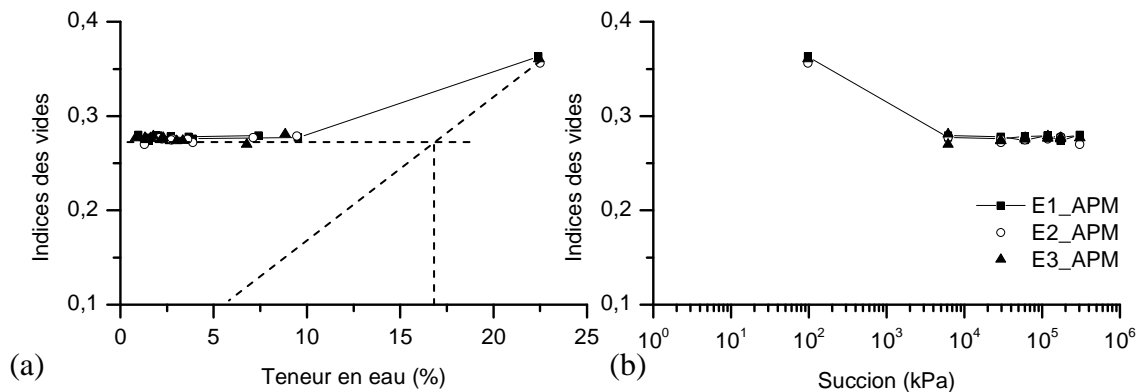


Figure 1.19 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de APM

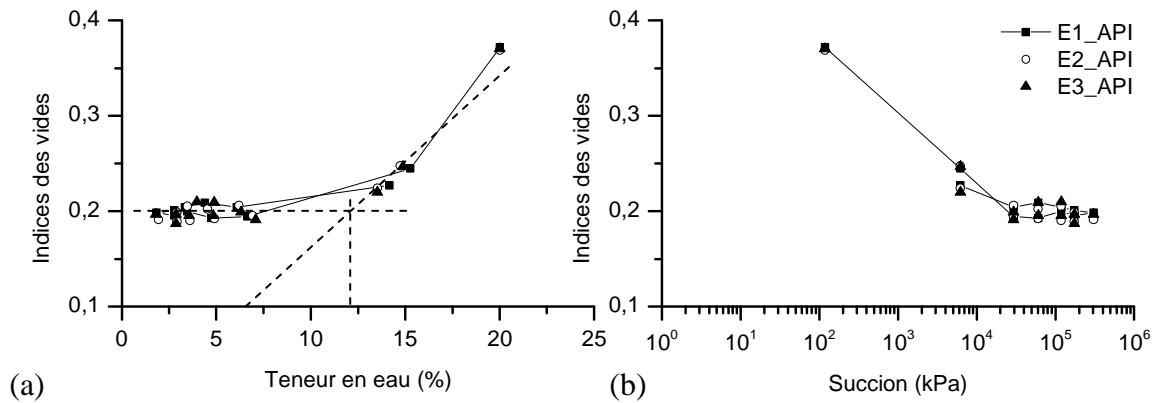


Figure 1.20 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de API

Les Figure 1.18, Figure 1.19 et Figure 1.20 présentent les courbes de retrait ($e-w$) et les courbes ($e-s$) des trois niveaux d'Argiles Plastiques, elles montrent que la variation d'indice des vides augmente en fonction de la profondeur. Pour les courbes représentant l'indice des vides en fonction de la succion ($e-s$) (Figure 1.18b ; Figure 1.19b ; Figure 1.20b), on observe une variation importante d'indice des vides pour les succions inférieures à 6 MPa environ pour APS et APM ; et à 30 MPa pour API. Cette variation est moins importante et tend à s'annuler quand les succions sont supérieures à ces valeurs. Pour API, on note une irréversibilité entre le drainage et l'humidification avant 30 MPa, et une quasi réversibilité au-dessus de cette valeur mais pour l'APS et l'APM, la réversibilité est observée dans toute la gamme de 6 MPa à 300 MPa. Si on met les graphes des courbes ($e-s$) en parallèle avec les graphes des courbes de retrait ($e-w$) (Figure 1.18a ; Figure 1.19a ; Figure 1.20a), on trouve des variations similaires et un palier qui traduit une stabilisation du volume à partir d'une teneur en eau de 15 % pour APS, de 16 % pour APM et de 12,5 % pour API. Dans le domaine saturé de la courbe de retrait, la variation de volume d'eau contenu dans l'échantillon est égale à la variation de volume du sol, ceci est représenté par une droite dans le diagramme ($e-w$). L'intersection de cette droite avec l'asymptote horizontale de la courbe quand la teneur en eau tend vers 0 correspond à la limite de retrait du sol. Ces deux graphes permettent de déterminer la limite de retrait $w_{Re} = 15 \%$, $e = 0,21$ (pour APS) et $w_{Re} = 16 \%$, $e = 0,27$ (pour APM) et $w_{Re} = 12,5 \%$, $e = 0,2$ (pour API) correspondant à une succion d'environ 2 MPa (APS et APM) et 11 MPa (API).

6.2.2. Courbe de rétention d'eau de l'argile d'Héricourt

La courbe de rétention d'eau de l'argile d'Héricourt a été déterminée en imposant aux échantillons des succions comprises entre 6,2 et 305 MPa par la méthode de la pression en phase vapeur et en mesurant les teneurs en eau obtenues. La succion des échantillons à l'état naturel initial est aussi mesurée par la méthode du papier-filtre.

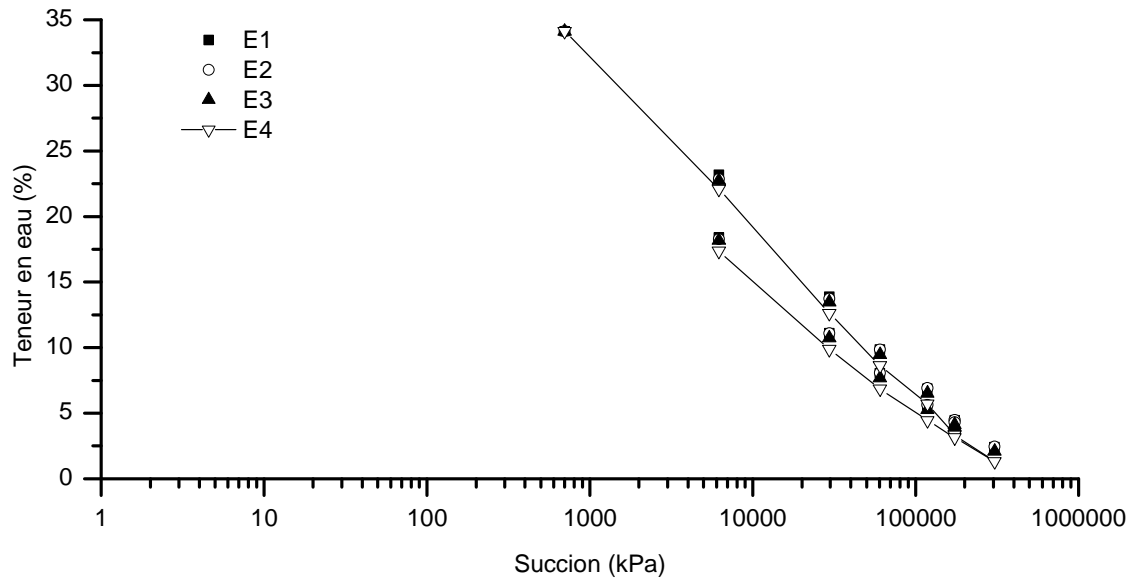


Figure 1.21 : Courbe de rétention d'eau de AH

L'évolution de la teneur en eau en fonction de la succion pour quatre échantillons de AH est présentée dans la Figure 1.21. La similitude des courbes de rétention d'eau pour les quatre échantillons montre une bonne homogénéité du matériau et une répétitivité des résultats. On observe aussi une quasi réversibilité entre le drainage et l'humidification pour les succions supérieures à 100 MPa et un phénomène d'hystérésis au-dessous de cette valeur pour AH.

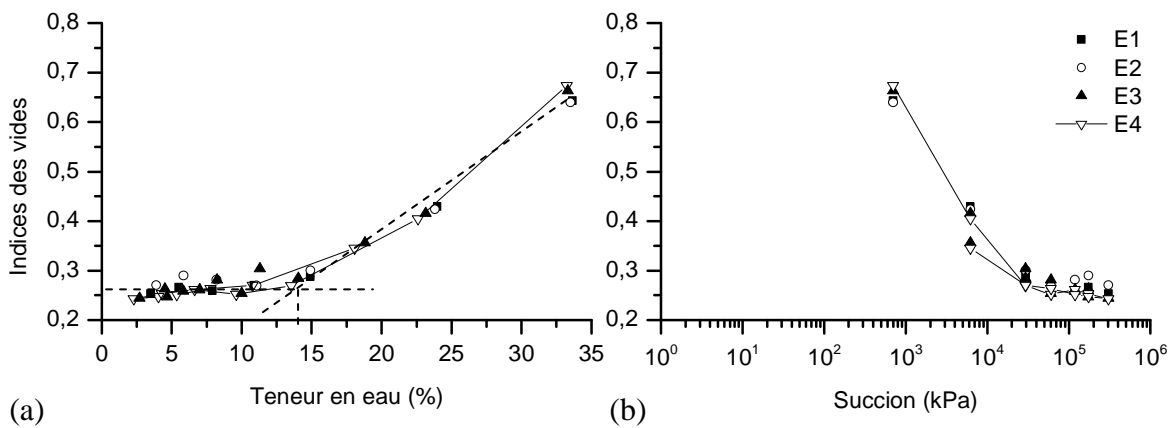


Figure 1.22 : (a) Courbe de retrait et (b) courbe $e-s$ de AH

La Figure 1.22b présente l'évolution de l'indice des vides en fonction de la succion ($e-s$) de AH. On observe une variation importante d'indice des vides pour les succions inférieures à 30 MPa environ. Au-dessus de cette valeur, cette variation est moins importante et tend à s'annuler. Il y a ainsi une irréversibilité entre le drainage et l'humidification avant 30 MPa et une quasi réversibilité au-dessus de cette valeur pour AH. Les deux graphes de courbe de retrait ($e-w$) (Figure 1.22a) et courbe ($e-s$) (Figure 1.22b) permettent de déterminer la limite de retrait de AH : $w_{Re} = 14 \%$, $e = 0,26$ correspondant à une succion d'environ 30 MPa.

6.2.3. Courbe de rétention d'eau de l'argile d'Héricourt compactée non-traitée et traitée à la chaux

Les courbes de rétention d'eau de l'argile d'Héricourt compactée non-traitée et traitée à la chaux ont été déterminées en mesurant la succion par la méthode de mesure du potentiel de l'eau par le potentiomètre et les teneurs en eau correspondantes.

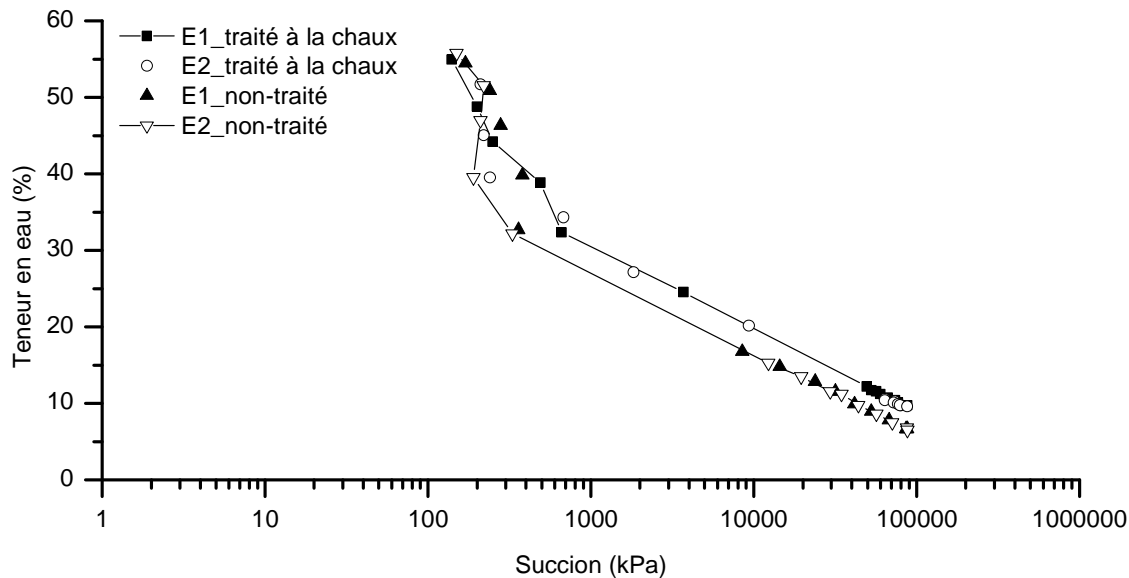


Figure 1.23 : Courbe de rétention d'eau de AH non-traitée et traitée à la chaux

L'évolution de la teneur en eau en fonction de la succion pour deux échantillons de chaque type de sol est présentée dans la Figure 1.23. La similitude des courbes des deux échantillons de chaque type de sol montre une bonne homogénéité du matériau et une répétitivité des résultats. On observe une quasi coïncidence entre les courbes des deux types de sol pour les succions supérieures à 1 MPa ; en dessous de cette valeur elles se séparent.

En comparaison avec la courbe de rétention d'eau de l'échantillon naturel (Figure 1.23), on peut trouver une similarité entre ces deux courbes et celle de l'échantillon naturel dans la gamme de succion supérieure à 0,7 MPa.

6.3. Conductivité hydraulique de l'argile d'Héricourt compactée

De nos jours, le traitement à la chaux est largement pratiqué dans l'ingénierie routière pour améliorer les propriétés géotechniques (résistance au cisaillement, compressibilité, etc.) des sols fins. Parmi les propriétés géotechniques, la conductivité hydraulique est un facteur important à considérer lorsque le sol traité est utilisé dans les ouvrages en terre en contact permanent avec de l'eau.

Un certain nombre de travaux sur le traitement à la chaux a montré qu'il existe deux processus distincts qui ont lieu lorsque la chaux vive est ajoutée à un sol humide : modification et stabilisation (Sherwood 1993 ; Rogers et Glendinning 1996 ; Boardman et al. 2001). La modification débute presque immédiatement et dure de 24 heures à 72 heures en fonction des minéraux argileux présents (Rogers et Glendinning 1996). Ce processus peut être divisé en deux phases si la chaux vive est utilisée dans le traitement : l'hydratation de la chaux vive et l'échange de cations. La stabilisation est en rapport avec la réaction pouzzolanique qui se

produit plus lentement à long terme et dépend de la température, de la chimie et de la minéralogie du sol étudié (Hunter 1988 ; Wild et al. 1993). Durant ce processus, la valeur élevée du pH dans le sol provoque la dissolution de la silice et de l'alumine qui se combinent avec le calcium en produisant des nouveaux composés comme les silicates de calcium hydratés (CSH), les aluminates de calcium hydratés (CAH) et les aluminosilicates de calcium hydratés (CASH) (Choquette et al. 1987 ; Bell 1996 ; Locat et al. 1996 ; Muller 2005).

De nombreux travaux ont été menés pour étudier l'effet de la chaux sur la conductivité hydraulique d'un sol compacté. Certains montrent une augmentation de la conductivité hydraulique avec le traitement à la chaux (Nalbantoglu et Tuncer 2001) et certains montrent une diminution. D'autres travaux montrent que la conductivité hydraulique du sol traité à la chaux augmente au début puis diminue après plusieurs jours de cure (Locat et al. 1996 ; Metelkova et al. 2011).

On soupçonne que les changements de conductivité hydraulique sont liés aux deux processus chimiques concernant le traitement à la chaux des sols. Cependant, comme dans toutes les études mentionnées ci-dessus, le sol humide a été mélangé avec de la chaux avant la préparation des échantillons par le compactage, il est impossible de distinguer les effets de la modification et de la stabilisation, parce que l'hydratation se produit surtout lors du mélange. Dans cette partie, le changement de la conductivité hydraulique pendant le processus de modification est étudié sur un échantillon préparé en mélangeant le sol sec avec de la chaux vive. La conductivité hydraulique de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux est déterminée à différents intervalles de temps de cure, à partir du début de traitement jusqu'à la stabilisation de cette valeur. Lorsque la stabilisation de la conductivité hydraulique est atteinte, la microstructure du sol est ensuite analysée par la porosimétrie au mercure et le microscope électronique à balayage (MEB). Un échantillon non traité est également étudié pour avoir une référence. Les résultats obtenus sur les deux sols, traité et non traité à la chaux, permettent de mettre en évidence les effets du traitement.

6.3.1. Mesure de la conductivité hydraulique

Pour préparer des échantillons, le sol pris sur le site de construction a été d'abord séché à l'air libre, puis concassé. Après tamisage à 2 mm, le sol a été stocké dans un conteneur étanche. La teneur en eau après cette phase était d'environ 8 %. Ensuite, un échantillon de sol a été compacté directement dans une cellule oedométrique de 70 mm de diamètre intérieur. La masse volumique sèche de l'échantillon compacté est égale à $1,40 \text{ Mg/m}^3$ et sa hauteur est égale à 20 mm. Pour compacter le second échantillon, le sol est d'abord mélangé avec 5 % de chaux vive avant le compactage. On note que cette quantité de chaux vive choisie est légèrement inférieure à l'indice ICL (consommation initiale de chaux : montant minimum de chaux nécessaire pour activer la réaction pouzzolanique) du sol, égale à 6,3 % (Marrot 2010). Le second échantillon a les mêmes dimensions et la même masse volumique sèche que le premier.

Après le compactage, les échantillons de sol ont été saturés et plongés dans l'eau suivant la norme ASTM D4546-95, permettant un gonflement libre (sous le poids du piston de l'oedomètre). Une fois le gonflement du sol stabilisé, la conductivité hydraulique du sol est mesurée. La méthode du perméamètre à charge variable est utilisée pour mesurer la conductivité hydraulique des échantillons saturés suivant la norme ASTM D5084-10. La pression d'eau maximale appliquée lors de la mesure est d'environ 4,5 kPa. Il faut noter qu'il n'y avait pas de charge sur le piston pendant la mesure. Chaque mesure de conductivité hydraulique prenait moins de 30 minutes.

Plusieurs mesures ont été effectuées pour l'échantillon non traité et l'échantillon traité à la chaux. Pour ce dernier, les mesures ont été poursuivies, en fonction du temps, jusqu'à stabilisation de la valeur de conductivité hydraulique.

La Figure 1.24 présente le taux de gonflement du sol mesuré sous condition de gonflement libre. Pour l'échantillon non traité, après immersion dans l'eau distillée, le sol commence à gonfler et son taux de gonflement se stabilise à 19 % au bout de 2 jours. En revanche, pour l'échantillon traité à la chaux, le gonflement a lieu immédiatement après l'immersion du sol dans l'eau ; le taux de gonflement se stabilise à 18 % après seulement quelques heures. Il faut noter que les taux de gonflement finaux des deux échantillons sont similaires (près de 18 %, avec une valeur légèrement plus grande pour l'échantillon non traité) et la masse volumique sèche finale du sol peut être estimée à $1,17 \text{ Mg/m}^3$.

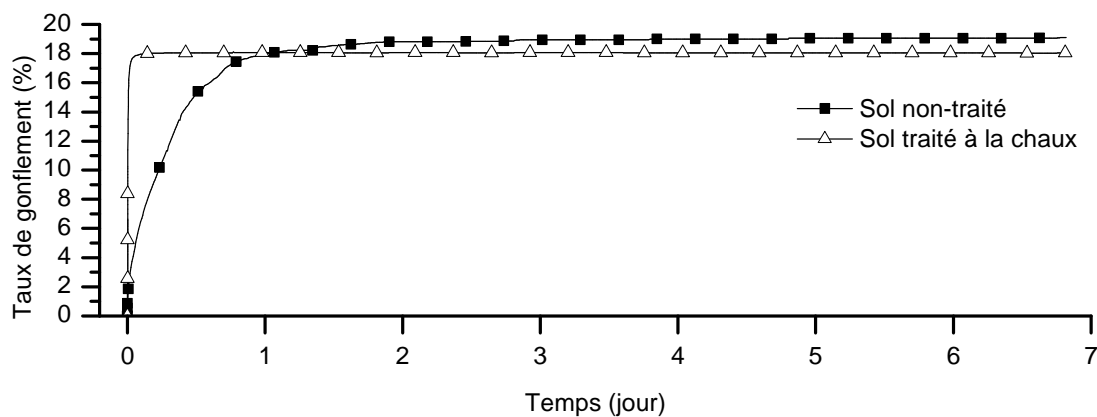


Figure 1.24 : Taux de gonflement des sols

Au cours de l'immersion, de la chaleur est générée dans l'échantillon de sol traité à la chaux. Ceci est démontré séparément dans l'essai d'infiltration sur un massif de sol traité à la chaux à l'échelle de la chambre environnementale (Figure 5.4d, chapitre 5). Après immersion, on mesure une augmentation rapide de la température de 20°C (température ambiante) à 25°C puis une diminution dans le temps. Cette augmentation de température correspond au processus d'hydratation de la chaux vive, réaction exothermique.

Les mesures de conductivité hydraulique ont été effectuées lorsque le gonflement libre avait atteint la stabilisation. Pour l'échantillon non traité, la première mesure a été effectuée 2 jours après le début de la saturation, quatre autres mesures ont été effectuées jusqu'au septième jour. Les résultats obtenus à différents jours sont similaires, soit $4 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (Figure 1.25). Pour l'échantillon traité à la chaux, la première mesure a été effectuée un jour après le début de la saturation. La valeur obtenue est de $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, significativement plus élevée que celle de l'échantillon non traité. Les mesures suivantes effectuées sur cet échantillon montrent que la conductivité hydraulique de l'échantillon de sol traité à la chaux augmente avec le temps et se stabilise à $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ trois jours après le début de la saturation. Enfin, la conductivité hydraulique de l'échantillon traité à la chaux est dix fois plus élevée que celle de l'échantillon non traité. Néanmoins on ne peut pas préjuger de l'évolution du sol traité à plus long terme (après 7 jours).

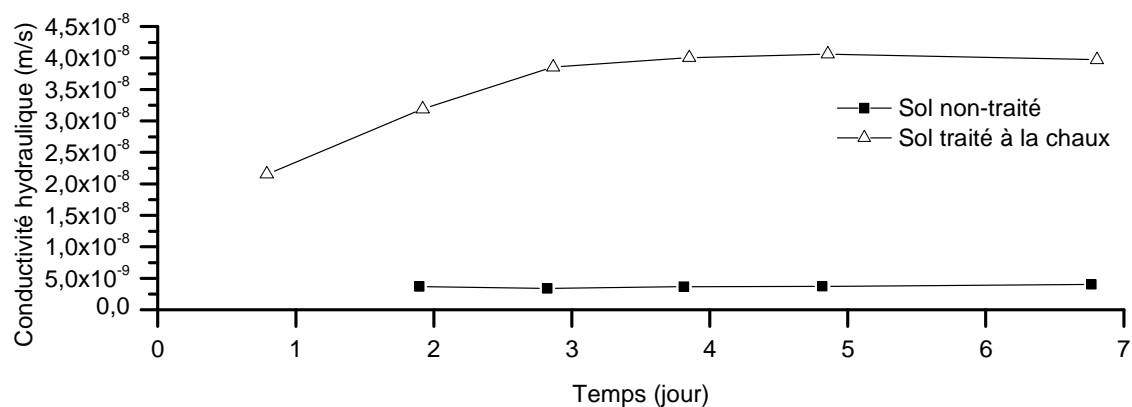


Figure 1.25 : Conductivité hydraulique des sols saturés

6.3.2. Aspects microstructuraux

La Figure 1.26 présente les résultats d'essais de porosimétrie au mercure obtenus sur des échantillons compactés pris à la fin des essais de gonflement libre déjà présentés. La Figure 1.26a montre que le volume poreux de l'échantillon de sol traité à la chaux, après stabilisation, est un peu plus élevé que celui de l'échantillon de sol non traité. Dans l'échantillon non traité, deux familles de pores ont été observées : des pores intra-agrégat de taille centrée vers $0,015 \mu\text{m}$ et des pores inter-agrégats (naturels et compactés) de taille centrée vers $1,5 \mu\text{m}$. Le traitement à la chaux a augmenté la taille moyenne des pores inter-agrégats (naturels et compactés) vers $3 \mu\text{m}$ (des changements dans la taille des pores intra-agrégats n'ayant pas été observés) (Figure 1.26b). Ceci explique l'augmentation du volume total des pores de l'échantillon traité à la chaux (Figure 1.26a).

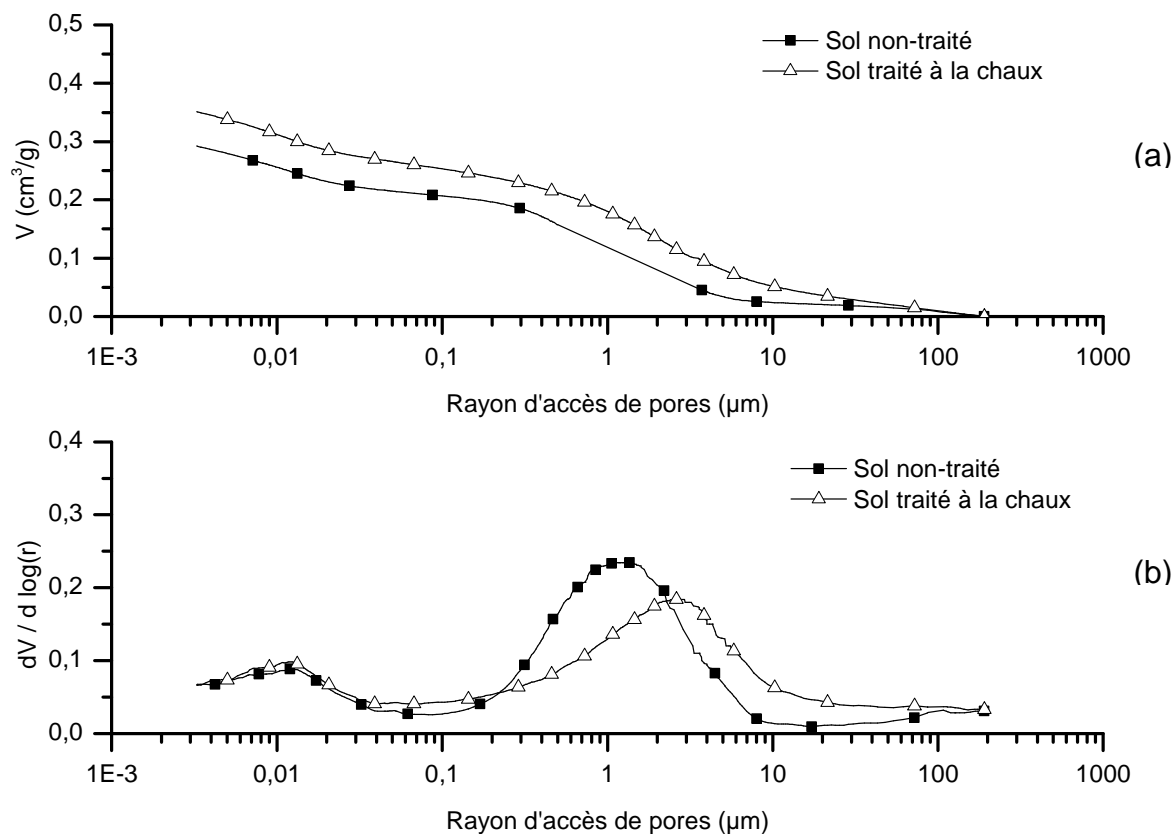


Figure 1.26 : Courbes porosimétriques des sols après gonflement

La Figure 1.27 présente les photos prises au MEB obtenues sur des échantillons compactés pris à la fin des essais de gonflement libre déjà présentés. A un faible grossissement, la Figure 1.27a et la Figure 1.27b montrent que la microstructure du sol traité à la chaux et celle du sol non traité sont totalement différentes. Pour l'échantillon non traité, une structure en agrégats compactés formée par les particules argileuses et des pores inter-agrégats peut être observée (Figure 1.27a). Pour l'échantillon traité à la chaux, après saturation, une structure en agrégats compactés et granulaire avec de nouveaux hydrates a été observée (Figure 1.27b). A plus fort grossissement, des pores inter-agrégats de quelques microns peuvent être clairement observés dans l'échantillon non traité (Figure 1.27c). Pour l'échantillon traité à la chaux, il a été observé que les silicates de calcium hydratés (CSH), de forme réticulaire, créés par le traitement à la chaux se sont développés dans les pores inter-agrégats (Figure 1.27d). Ces nouveaux minéraux résultent de la réaction pouzzolanique entre la chaux et les minéraux argileux. On note aussi que dans le travail de Maubec (2010), les silicates de calcium hydratés (CSH) sont trouvés dans des échantillons de bentonite traités à la chaux par diffraction des rayons X avec une forme similaire observée au MEB.

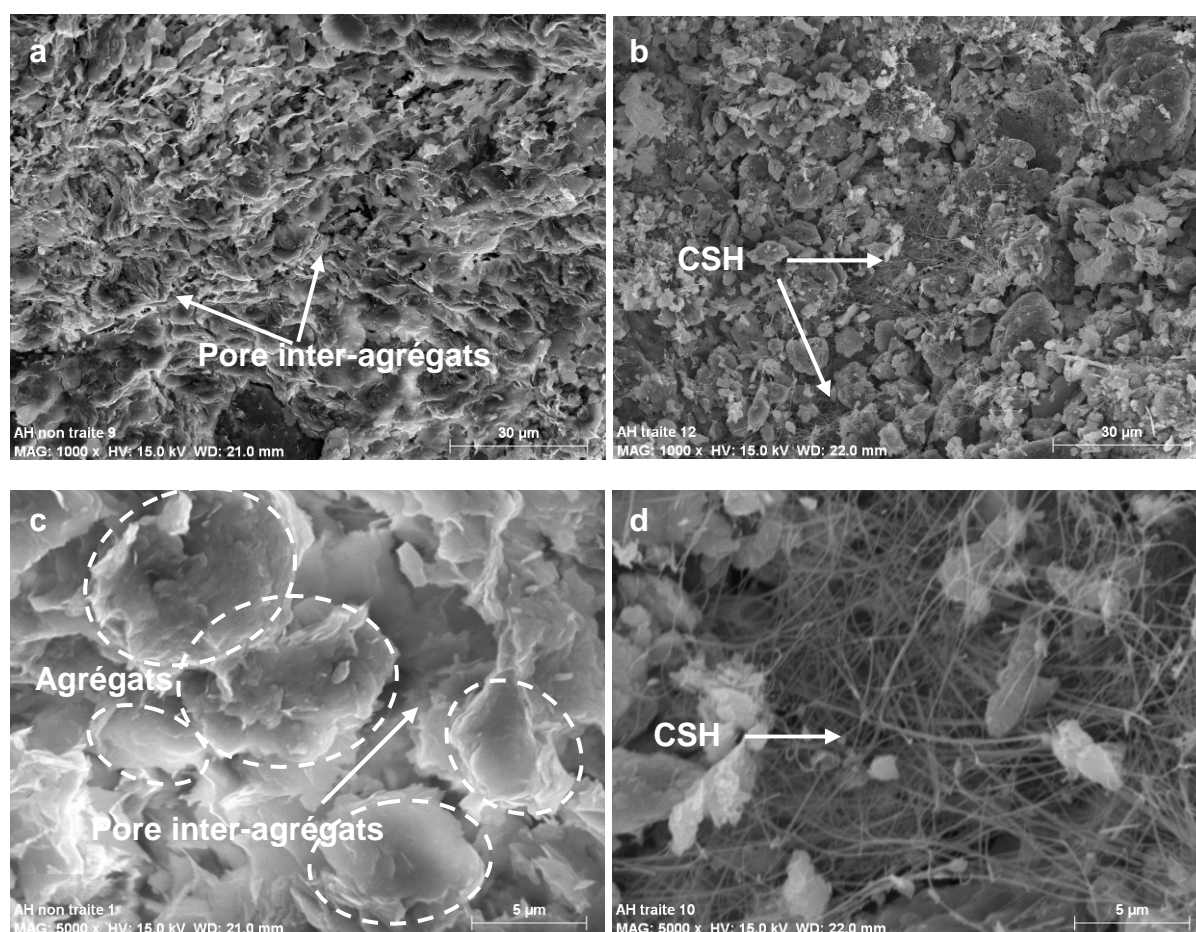


Figure 1.27 : Photos de MEB des échantillons après gonflement : a, c) Echantillon non-traité, b, d) Echantillon traité à la chaux

6.3.3. Discussions et conclusions

Les valeurs finales de taux de gonflement sont similaires pour l'échantillon non traité et l'échantillon traité à la chaux. Ce résultat semble être en conflit avec d'autres présentés dans la littérature (Al-Rawas et al. 2005 ; Lasledj et Al-Mukhtar 2008). En fait, le gonflement

rapide de l'échantillon traité à la chaux est principalement lié au processus d'hydratation de la chaux. Comme mentionné précédemment, le sol « sec » (8 % de teneur en eau) a été mélangé avec de la chaux, et donc aucune hydratation significative peut être attendue avant l'immersion dans l'eau. L'augmentation de la température dans l'essai d'infiltration sur l'échantillon de sol à l'échelle de la chambre environnementale (Figure 5.4d, chapitre 5) confirme que l'hydratation de la chaux a eu lieu. Sous l'effet de l'hydratation de la chaux, l'échantillon de sol traité à la chaux gonfle (via l'expansion de la chaux et la hausse de température) et atteint un taux de gonflement comparable à celui de l'échantillon non-traité.

Dans la mesure de la conductivité hydraulique, une augmentation progressive de la conductivité hydraulique pendant 3 jours après immersion a été observée pour le sol traité à la chaux. Après stabilisation, le sol traité à la chaux a une conductivité hydraulique d'un ordre de grandeur supérieur à celle du sol non traité. Cette observation suggère que l'hydratation et l'échange de cations dure 3 jours après le début de l'immersion dans les conditions de l'expérimentation conduite au laboratoire. Les changements de microstructure dus à l'effet d'hydratation (l'expansion de la chaux et l'augmentation de température) est la raison principale de cette augmentation de la conductivité hydraulique. Ces changements de microstructure ont été clairement identifiés par les observations au MEB. Nalbantoglu et Tuncer (2001) ont également mesuré la conductivité hydraulique d'une argile gonflante traitée avec 5 % de chaux à 30 jours et 100 jours. Les résultats ont montré que la conductivité hydraulique du sol traité à la chaux a augmenté d'environ deux ordres de grandeur après le traitement et a continué à augmenter après 100 jours. Cette durée est beaucoup plus longue que les trois jours identifiés dans cette étude. En outre, McCallister et Petry (1992) ont étudié trois argiles de plasticité élevée et montré que leur conductivité hydraulique augmente de plus de deux ordres de grandeur si la quantité de chaux ajoutée est inférieure à l'indice ICL, mais diminue avec une augmentation supplémentaire de chaux ajoutée. Ceci montre que le processus de modification peut durer plus ou moins longtemps, en fonction de la nature du sol, la microstructure du sol et en particulier la présence d'eau.

Il est observé que la taille des pores intra-agrégats n'a pas changé après le traitement à la chaux. La conséquence de l'ajout de chaux a été une augmentation de taille des pores inter-agrégats et donc une augmentation de la conductivité hydraulique. Russo et Dal Vecchio (2006) ont également constaté que l'addition de chaux affecte principalement la porosité inter-agrégats pour un limon traité à la chaux. Cela confirme que la conductivité hydraulique dépend principalement des pores inter-agrégats, les effets des pores intra-agrégats étant limité. Ceci est en accord avec le travail de Cuisinier et al. (2011), qui montre que la conductivité hydraulique est contrôlée principalement par le volume des pores de grande taille ($> 3 \mu\text{m}$) et non pour les petits pores ($< 0,3 \mu\text{m}$) et pores moyens ($0,3 \mu\text{m} < r < 3 \mu\text{m}$). On note cependant que Cuisinier et al. (2011) ont observé que l'ajout de chaux conduit à la formation d'une famille de pores de petite taille ($< 0,3 \mu\text{m}$) dans le sol compacté traité à la chaux à l'optimum Proctor, alors que Russo et Dal Vecchio (2006) ont observé la formation d'une famille des larges pores ($r > 3 \mu\text{m}$) dans les échantillons traités à la chaux, mais ces pores ont disparu après 7 jours de cure.

Les photos de MEB illustrent un changement significatif dans la microstructure du sol traité à la chaux par rapport à celle du sol non traité. Elles ont révélé que, dans les conditions de l'essai, il y a eu deux réactions : modification et stabilisation après 7 jours, bien que la quantité de chaux utilisée soit inférieure à l'indice ICL du sol. En effet, la structure granulaire du sol traité à la chaux prouve qu'il y a floculation quand la chaux est ajoutée et la présence de nouveaux minéraux rend compte de la réaction pouzzolanique entre la chaux et les minéraux argileux. Cependant, il faut noter également que la quantité de chaux (5 %) utilisée dans cette

étude est légèrement inférieure à l'indice ICL du sol et Rogers et Glendinning (2000) ont montré que la méthode proposée par Eades et Grim (1966) pour déterminer l'indice ICL était sensible à la qualité de la chaux (présence d'impuretés), à la température, au volume d'eau et conduit souvent à une surestimation de la quantité de chaux nécessaire au développement des réactions pouzzolaniques. En se basant sur des mesures expérimentales des concentrations d'ions, de pH et de la conductivité hydraulique des mélanges de chaux et d'argile à des moments différents, Boardman et al. (2001) ont montré qu'aucune activité pouzzolanique significative n'a lieu avant 7 jours de cure. En outre, Locat et al. (1996) et Onitsuka et al. (2001) ont expliqué la diminution de la conductivité hydraulique du sol traité par la croissance des nouveaux minéraux dans les pores inter-agrégats. Ainsi, la stabilisation dans l'évolution de la conductivité hydraulique, observée dans cette étude après 7 jours, ne correspond qu'à la seule condition d'essai adoptée. Une diminution de la conductivité hydraulique pourrait être attendue avec plus d'effet de la réaction pouzzolanique, c'est à dire avec une plus longue durée de l'essai.

En conclusion, cette étude montre que l'hydratation de la chaux augmente significativement le volume du sol en raison des effets de l'expansion de la chaux et de l'augmentation de température. En conséquence, le volume des pores inter-agrégats est augmenté, ce qui donne lieu à une augmentation de la conductivité hydraulique. Les photos de MEB montrent que les deux réactions de modification et de stabilisation ont eu lieu dans la période d'essai (7 jours). Comme le processus de stabilisation conduit généralement à une baisse de volume des pores inter-agrégat, une diminution de la conductivité hydraulique peut être attendue pour une plus longue durée.

7. Conclusions

Ce chapitre regroupe l'ensemble des essais expérimentaux réalisés sur les échantillons des deux formations (Argiles Plastiques et argile d'Héricourt) pour étudier leurs caractéristiques minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques. L'analyse de l'ensemble des résultats de cette étude permet d'énoncer plusieurs caractéristiques principales de ces sols.

Les résultats de l'étude minéralogique montrent que les échantillons des trois niveaux de la formation des Argiles Plastiques ont une composition minéralogique voisine. Ils sont composés essentiellement de Kaolinite, d'Illite, et d'interstratifiés Illite-Smectite. Les minéraux non argileux sont représentés par du quartz, des oxydes de Ti et des pyrites (dans APM). La proportion de quartz diminue avec la profondeur. Pour l'argile d'Héricourt, deux minéraux argileux sont présents l'Illite et les Smectites, soit sous forme distincte soit en interstratifiés Illite-Smectite. La Kaolinite n'est pas présente dans ce sol. Les minéraux non argileux sont représentés par du quartz et des feldspaths.

L'étude microstructurale (voir aussi Tableaux I et V en Conclusion générale et perspectives) montre que les échantillons des trois niveaux d'Argiles Plastiques ont des microstructures différentes. APS présente une distribution bimodale avec deux familles de pores intra-agrégat ; API présente une distribution bimodale avec deux familles de pores dont une intra-agrégat et une inter-agrégats ; tandis que APM présente une distribution unimodale avec une seule famille de pores intra-agrégat. Pour l'argile d'Héricourt, elle présente une distribution bimodale avec deux familles de pores dont une intra-agrégat et une inter-agrégats, caractéristiques d'une structure du sol en agrégats naturels.

Les résultats des analyses géotechniques montrent que pour les Argiles Plastiques, l'indice de plasticité, la teneur en fines et la valeur de bleu augmentent avec la profondeur. Ces sols sont

très plastiques (sauf APS), denses, avec un potentiel de gonflement important. Pour l'argile d'Héricourt, elle est classée dans le domaine des limons très plastiques et a une granulométrie à dominante argileuse ($78 \% < 2\mu\text{m}$). Les valeurs de limite de liquidité et de limite de plasticité du sol augmentent après le traitement à la chaux.

L'analyse des courbes de rétention d'eau et des courbes de retrait permet de décrire le comportement hydromécanique global des sols étudiés et de déterminer ainsi la limite de retrait et les suctions correspondantes pour chaque matériau. Les chemins de drainage et d'humidification sont quasi réversibles pour des suctions supérieures à 100 MPa et présentent un phénomène d'hystérésis pour des suctions plus faibles pour tous les sols étudiés.

Chapitre 2 - *Analyse du processus de gonflement*

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, l'estimation préliminaire des propriétés de gonflement des sols étudiés est déjà donnée via leurs caractérisations minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques. Cependant, les mesures directes de gonflement au laboratoire sont indispensables pour l'étude du gonflement des sols argileux. Dans la littérature, on utilise souvent les trois notions suivantes pour décrire le gonflement à l'échelle macroscopique du sol : la *pression de gonflement* (σ_g) qui est définie comme l'état de contrainte à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion jusqu'à sa saturation complète ; le *potentiel de gonflement* (ε_g) qui est la déformation verticale maximale que provoque l'imbibition du sol soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète ; et l'*indice de gonflement* (C_g) qui traduit l'importance de la déformation de gonflement induite par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné où cette déformation par gonflement est obtenue au bout d'un temps d'équilibre.

Il existe plusieurs procédures d'essais de gonflement pour mesurer les trois termes de gonflement ci-dessus (Serratrice et Soyez 1996). Cependant, les trois techniques suivantes sont le plus souvent utilisées dans la bibliographie : l'essai de gonflement libre, l'essai de gonflement à différentes charges constantes et l'essai de gonflement à volume constant. Ces trois essais sont décrits dans les normes : Méthode du gonflement libre ASTM D 4546-96 (1996, Méthode A), Méthode sous charge constante ASTM D 4546-96 (1996, méthode B), et Méthode à volume constant, ASTM D 4546-96 (1996, méthode C).

Dans ce chapitre, les propriétés de gonflement des sols étudiés sont étudiées en mesurant directement le potentiel de gonflement et la pression de gonflement par les essais de laboratoire. Les protocoles d'essais sont d'abord présentés. Ensuite, les résultats d'essais de gonflement libre des sols étudiés sont analysés à l'état naturel et à l'état remanié pour les Argiles Plastiques et à l'état compacté en plus pour l'argile d'Héricourt. Puis, les résultats d'essai de gonflement obtenus au moyen de deux procédures particulières (essais de gonflement par la méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation et essai par la méthode à volume constant) sont présentés pour mesurer la pression de gonflement. L'étude des modifications de microstructure des sols au cours du gonflement libre est aussi réalisée. Enfin, les résultats obtenus sur le gonflement libre des sols étudiés sont utilisés dans le modèle microstructural de Ferber (2005).

2. Protocoles d'essai et méthodes utilisées

Les essais de gonflement sont réalisés dans des moules oedométriques (Figure 2.1).



Figure 2.1 : Moule oedométrique

Les échantillons intacts, de forme cylindrique, de diamètre 70 mm et de hauteur 20 mm, sont d'abord taillés avec une trousse coupante et les deux extrémités sont dressées de façon à obtenir des surfaces planes parallèles. Il faut noter que la surface intérieure du moule est huilée préalablement. Une fois l'échantillon taillé, des pierres poreuses sèches et des papiers filtres sont placés dans le moule au-dessus et au-dessous de l'échantillon. Le comparateur est mis en place sur le piston. Enfin, l'échantillon est alimenté en eau par le haut et le bas du moule.

Pour préparer les échantillons remaniés au laboratoire, le sol naturel est d'abord mélangé avec de l'eau et homogénéisé à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité. La pâte obtenue est ensuite séchée pour revenir à la teneur en eau correspondant à celle du sol naturel. Enfin, les échantillons remaniés sont taillés de façon similaire aux échantillons intacts.

Pour les échantillons compactés, tout d'abord, le sol naturel est séché à l'air libre. Ensuite, il est broyé et tamisé à 2 mm. Puis, le sol est stocké dans un récipient étanche à l'air en vue d'une homogénéisation de la teneur en eau avant compactage. La teneur en eau après cette phase est d'environ 8 %. Le sol est enfin compacté directement dans les moules oedométriques à la densité voulue.

L'évolution du gonflement est mesurée à l'aide de capteurs de déplacement au 1/1000 de mm. Les mesures de déplacement sont enregistrées à intervalles de temps croissants et acquises automatiquement.

L'essai de gonflement libre et l'essai de mesure de pression de gonflement sont réalisés sur les Argiles Plastiques et l'argile d'Héricourt à différents états. Deux paramètres caractérisant la sensibilité au gonflement des sols sont obtenus à partir de ces deux essais : le potentiel de gonflement et la pression de gonflement. Pour la pression de gonflement, elle est déterminée soit par la méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation (ASTM D 4546-96, méthode A), soit par la méthode à volume constant (ASTM D 4546-96, méthode C).

Dans la méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation : l'échantillon est d'abord soumis au processus d'imbibition sous condition de gonflement libre avec une contrainte correspondant à la pression du piston, d'environ 0,5 kPa. Les déformations verticales sont mesurées jusqu'à la stabilisation. La déformation maximale obtenue, rapportée à la hauteur initiale, correspond au potentiel de gonflement du sol. Une fois la déformation stabilisée, la consolidation est suivie par le chargement par paliers, de manière progressive. La pression de

gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale.

Le principe de la méthode à volume constant est que l'échantillon est soumis au processus d'imbibition tout en maintenant son volume constant. Pour maintenir le volume constant, une pression verticale voisine des conditions in situ ou d'une pression de gonflement estimée est appliquée sur l'échantillon avant humidification. En outre, la déformation verticale est empêchée en augmentant progressivement la charge appliquée dans le cas où l'échantillon gonfle encore. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant est la pression de gonflement du sol.

3. Résultats

3.1. Gonflement libre et potentiel de gonflement

3.1.1 Argile Plastique

Les essais de gonflement libre ont été réalisés sur l'ensemble des trois niveaux d'Argiles Plastiques APS, APM, API à l'état intact et remanié au laboratoire. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 2.1. A titre d'exemple les courbes de gonflement libre des échantillons intacts et remaniés des Argiles Plastiques sont données dans la Figure 2.2.

Tableau 2.1 : Résultats du gonflement libre de l'ensemble des échantillons

Formation	APS	APM	API	<i>E-AVR-0*</i>	<i>E-MBA-01*</i>	<i>E-MBA-0*</i>
Echantillons intacts						
Taux de gonflement libre (%)	4	8,5	10,5	16	4	2,4
Teneur en eau avant le gonflement (%)	20	20	21	28	24	37
Masse volumique sèche avant de gonflement (Mg/m ³)	1,7	1,7	1,7	1,5	1,6	1,4
Echantillons remaniés						
Taux de gonflement libre (%)	13	21	19	32	25	24
Teneur en eau avant le gonflement (%)	20	21	21	27	27	30
Masse volumique sèche avant de gonflement (Mg/m ³)	1,6	1,7	1,7	1,5	1,6	1,4
Rapport taux gonfl. rem/int	3,3	2,5	1,8	2,0	6,3	10

(* : Yigzaw 2009)

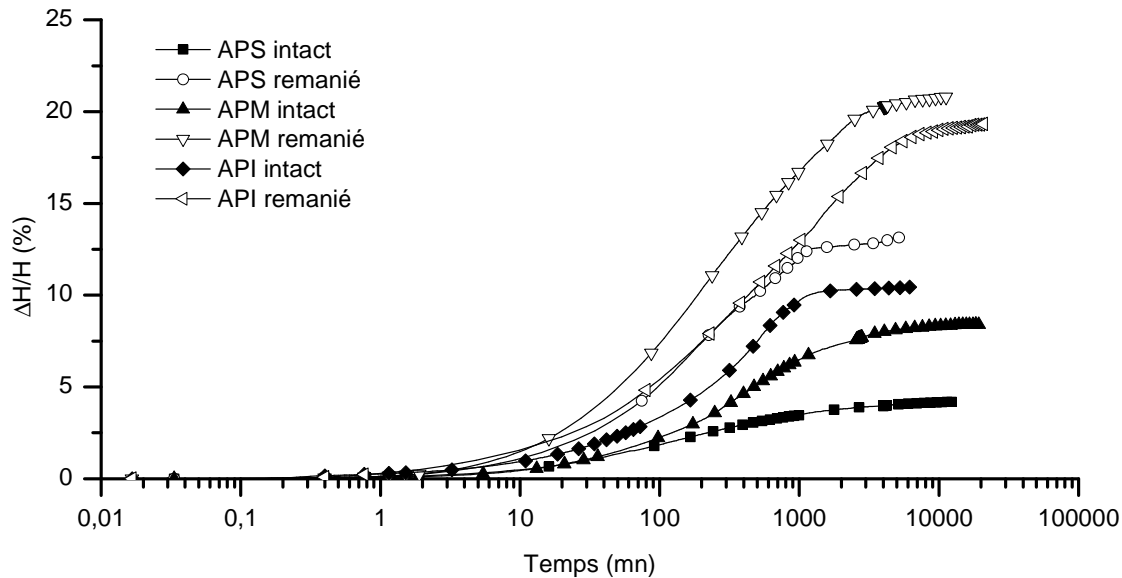


Figure 2.2 : Cinétique du gonflement des Argiles Plastiques

De l'analyse des résultats des essais de gonflement libre il ressort les remarques suivantes :

- Les courbes de cinétique de gonflement ont une forme classique, avec un gonflement primaire relativement rapide suivi d'un gonflement secondaire de faible amplitude par rapport au gonflement primaire (Parcevaux 1980 ; Alonso et al. 1989). Il est donc acceptable de dire que l'essentiel du gonflement est réalisé à la fin du gonflement primaire. D'après Alonso et al. (1989, 1991), le gonflement primaire est lié au processus de diffusion ou de migration de l'eau dans les pores de l'éprouvette tandis que la phase de gonflement secondaire est liée à l'hydratation progressive des minéraux argileux qui correspond à un processus de cinétique lente ;
- La comparaison des taux de gonflement des 3 niveaux d'Argile Plastique intacte met en évidence, pour une même teneur en eau d'origine, une sensibilité au gonflement beaucoup moins importante pour APS. La sensibilité la plus forte enregistrée pour API est en accord avec la nature minéralogique et les caractéristiques géotechniques (% en argiles gonflantes, % en particules fines et plasticité plus élevés pour API que pour les 2 autres niveaux) ;
- Les résultats de l'analyse des potentiels de gonflement (Tableau 2.1) montrent que les taux de gonflement sont différents entre les niveaux de AP mais aussi entre l'état intact et l'état remanié d'un même niveau, à teneurs en eau de départ voisines. Ce phénomène présente une analogie avec ce qui a été observé pour les formations AVR et MBA.
- La sensibilité au gonflement, à teneur en eau de départ voisine, est pour chaque matériau étudié plus importante pour le matériau remanié que pour le matériau intact. Pour une teneur en eau équivalente, le taux de gonflement de APS passe de 4 % à 13 % entre l'état intact et l'état remanié, celui de APM passe de 8,5 % à 21 % et celui de API passe de 10,5 % à 19 %. APM et API ont des taux de gonflement voisins et supérieurs à celui de APS. Plus que la forte proportion en quartz dans APS, c'est certainement la disposition de ces quartz observée au MEB (Figure 2.7) et la microstructure correspondante qui sont à l'origine d'une plus faible sensibilité au gonflement concernant APS à l'état intact, comparée à celles de APM et API.

- Par comparaison, AVR est également plus sensible au gonflement à l'état remanié qu'à l'état intact et son taux de gonflement est supérieur à celui de MBA. Les échantillons de MBA sont d'autant moins sensibles au gonflement à l'état intact que la teneur en carbonate est élevée (Audiguier et al. 2008). Comme les carbonates dans MBA, la proportion de quartz et leur arrangement dans les trois niveaux de AP jouent un rôle dans l'aptitude au retrait-gonflement, en rigidifiant quelque peu l'édifice microstructural.
- Bien que les échantillons des trois niveaux de AP intacts soient plus denses et leurs teneurs en eau plus faibles que celles des échantillons de AVR et de MBA, leurs potentiels de gonflement sont plus faibles. La proportion plus faible d'interstratifiés Illite-Smectite (minéraux argileux gonflants) et la forte proportion de Kaolinite (minéral argileux non gonflant) expliquent en partie un pouvoir de gonflement plus faible pour les trois niveaux de AP que pour ceux de AVR et MBA.

3.1.2 Argile d'Héricourt

Pour l'argile d'Héricourt, les essais de gonflement libre ont été réalisés pour trois différents états : intact, remanié au laboratoire et compacté. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.2. Les courbes qui présentent la cinétique du gonflement sont données dans la Figure 2.3.

Tableau 2.2 : Résultats du gonflement libre de l'argile d'Héricourt

Echantillons	Intact	Remanié	Compacté
Taux de gonflement libre (%)	9	21,5	28
Teneur en eau avant le gonflement (%)	31	32	7
Masse volumique sèche avant de gonflement (Mg/m ³)	1,49	1,43	1,40

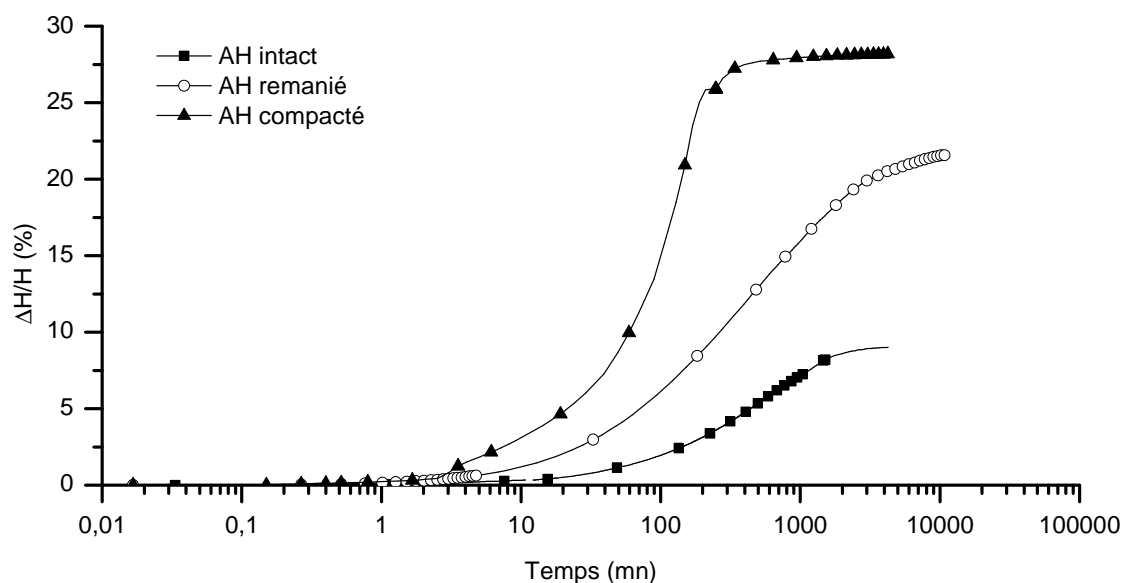


Figure 2.3 : Cinétique du gonflement de l'argile d'Héricourt

La Figure 2.3 présente les résultats des essais de gonflement libre obtenus sur l'argile d'Héricourt à l'état naturel, remanié et compacté. Ces trois courbes de cinétique de

gonflement ont également une forme classique, avec un gonflement primaire relativement rapide suivi d'un gonflement secondaire de faible amplitude par rapport au gonflement primaire (Parcevaux 1980 ; Alonso et al. 1989). La comparaison du potentiel de gonflement entre les trois échantillons montre que l'échantillon naturel a le potentiel de gonflement le plus bas (9 %), l'échantillon remanié présente un potentiel de gonflement supérieur (22 %) et l'échantillon compacté présente le potentiel de gonflement le plus élevé (28 %). Il faut noter qu'ils ont des masses volumiques sèches similaires ($1,49 \text{ Mg/cm}^3$ pour l'échantillon naturel ; $1,43 \text{ Mg/cm}^3$ pour l'échantillon remanié, et $1,40 \text{ Mg/cm}^3$ pour l'échantillon compacté), mais avec différentes teneurs en eau initiales (32 % pour l'échantillon naturel et remanié, 7 % pour l'échantillon compacté).

3.2. Pression de gonflement

3.2.1 Argile Plastique

Le Tableau 2.3 synthétise les résultats des pressions de gonflement obtenues sur l'ensemble des échantillons des trois niveaux d'Argiles Plastiques. Sur les Figures 2.4 et 2.5 sont donnés des exemples de mesure de pression de gonflement respectivement par la méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation et par la méthode à volume constant.

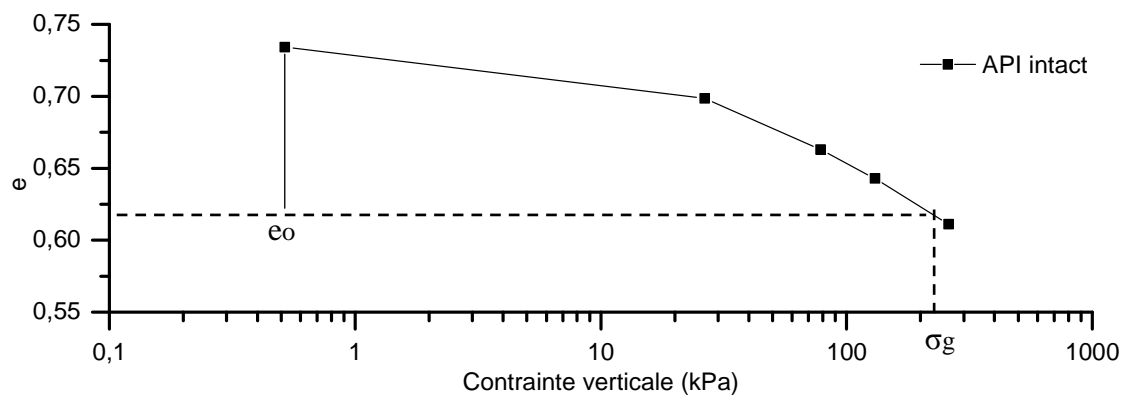


Figure 2.4 : Méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation. Exemple de API intact

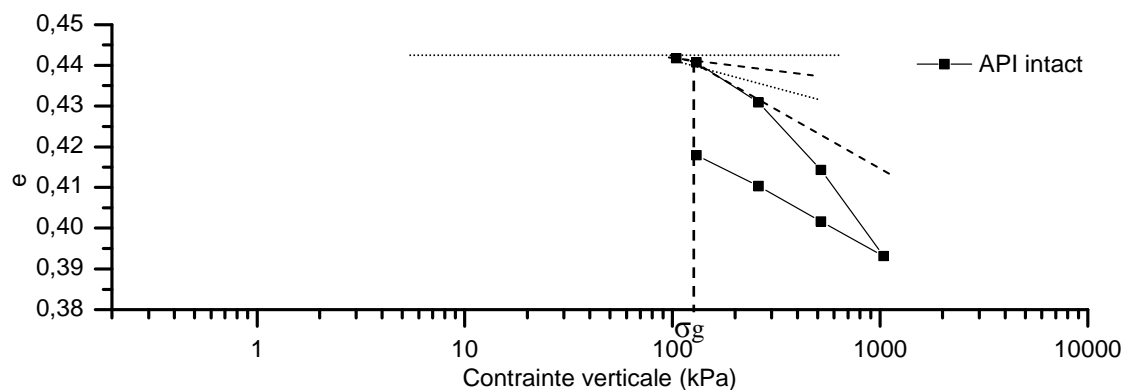


Figure 2.5 : Méthode à volume constant. Exemple de API intact

L'analyse du Tableau 2.3 conduit aux remarques suivantes :

- D'une méthode à l'autre les résultats sont parfois très différents et pour une même méthode les valeurs obtenues varient parfois du simple au double. Cette dispersion des valeurs est due à une différence des conditions initiales à laquelle peuvent s'ajouter de faibles variations inhérentes à l'appareillage ;
- La méthode à volume constant donne les valeurs les moins dispersées ;
- Comme pour le potentiel de gonflement, la pression de gonflement des Argiles Plastiques est aussi plus faible que celle des échantillons de AVR et de MBA bien que les échantillons des trois niveaux de AP intacts soient plus denses et leurs teneurs en eau plus faibles. La valeur de pression de gonflement des Argiles Plastiques augmente aussi avec la profondeur.

Tableau 2.3 : Pression de gonflement de AP, AVR et MBA

(Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation, GL=gonflement libre)

Echantillon	w_o (%)	ρ (Mg/m ³)	ρ_d (Mg/m ³)	e_o	$\Delta H/H_o$ (%)	σ_g (kPa)	Méthode
APS	15,2	2,24	1,94	0,34	4,8	86	GL-C
	19,3	2,06	1,73	0,51	2,0	30	GL-C
	20,3	2,07	1,73	0,51	4		GL
	16,2	2,19	1,89	0,38		70	VC
	18,5	2,10	1,77	0,47		60	VC
APM	18,4	2,11	1,78	0,51	4,3	110	GL-C
	19,5	2,10	1,75	0,54	6,4	222	GL-C
	20	2,07	1,71	0,56	8,4		GL
	18,4	2,12	1,79	0,51		110	VC
	19,4	2,09	1,75	0,54		130	VC
API	17,3	2,15	1,83	0,51	2,6	109	GL-C
	21,7	2,07	1,70	0,63	6,7	202	GL-C
	21	2,09	1,72	0,60	10,5		GL
	17,5	2,19	1,87	0,48		130	VC
	21,2	2,08	1,71	0,61		200	VC
E-AVR-0*	29,1	1,94	1,50	0,90		360	GL-C
	25,0	2,00	1,60	0,78		540	GL-C
	24,9	2,04	1,63	0,74		500	GL-C
	25,0	2,03	1,62	0,75		990	GL-C
	23,6	2,05	1,66	0,72		990	GL-C
	25,5	1,99	1,58	0,80		700	VC
	23,6	1,99	1,61	0,77		670	VC
E-MBA-01*	26,7	2,02	1,59	0,81		550	GL-C
	23,9	2,04	1,64	0,74		750	GL-C
	29,9	2,00	1,54	0,86		450	VC
	27,0	2,04	1,61	0,78		470	VC
E-MBA-0*	37,3	1,89	1,38	1,01		207	GL-C
	38,0	1,88	1,37	1,03		165	GL-C
	37,9	1,88	1,36	1,03		180	VC
	37,6	1,89	1,37	1,02		160	VC

(* : Yigzaw 2009)

3.2.2 Argile d'Héricourt

Le Tableau 2.4 regroupe les résultats des pressions de gonflement obtenues sur les échantillons de l'argile d'Héricourt.

Tableau 2.4 : Pression de gonflement de l'argile d'Héricourt
(Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation)

Echantillon	w_o (%)	ρ (Mg/m ³)	ρ_d (Mg/m ³)	e_o	$\Delta H/H_o$ (%)	σ_g (kPa)	Méthode
AH	30,4	1,93	1,48	0,82	4,5	86	GL-C
	31,8	1,90	1,44	0,87	4,8	81	GL-C
	30,5	1,96	1,50	0,80	9	115	GL-C
	31,8	1,94	1,47	0,83		140	VC
	32,8	1,91	1,44	0,87		110	VC
	31,7	1,91	1,45	0,86		120	VC

L'analyse du Tableau 2.4 conduit aux remarques suivantes :

- La dispersion des valeurs de pression de gonflement est aussi notée pour les échantillons d'argile d'Héricourt. La méthode à volume constant donne aussi les valeurs les moins dispersées ;
- Les plus grandes différences sont enregistrées pour AH pour laquelle la valeur moyenne passe de 81 kPa par la méthode du gonflement libre avec consolidation à 140 kPa par la méthode à volume constant.

3.3. Aspects microstructuraux du gonflement

3.3.1 Argile Plastique

Les résultats des essais porosimétriques des échantillons de APS, APM et API sont regroupés dans le Tableau 2.5.

Les échantillons séchés à l'étuve (APS, APM et API) présentent une distribution unimodale avec une famille de pores intra-agrégat centrée sur 0,025 μm pour APS, 0,02 μm pour APM et 0,007 μm pour API, prolongée vers les faibles rayons par une queue de distribution dénotant ainsi une porosité inter-particulaire non accessible par la porosimétrie au mercure (Figure 2.6). Cette courbe est caractéristique d'une structure matricielle argileuse compacte (Audiguier et Delage 1987). On trouve que le séchage à l'étuve détruit la famille de pores inter-agrégats des sols intacts.

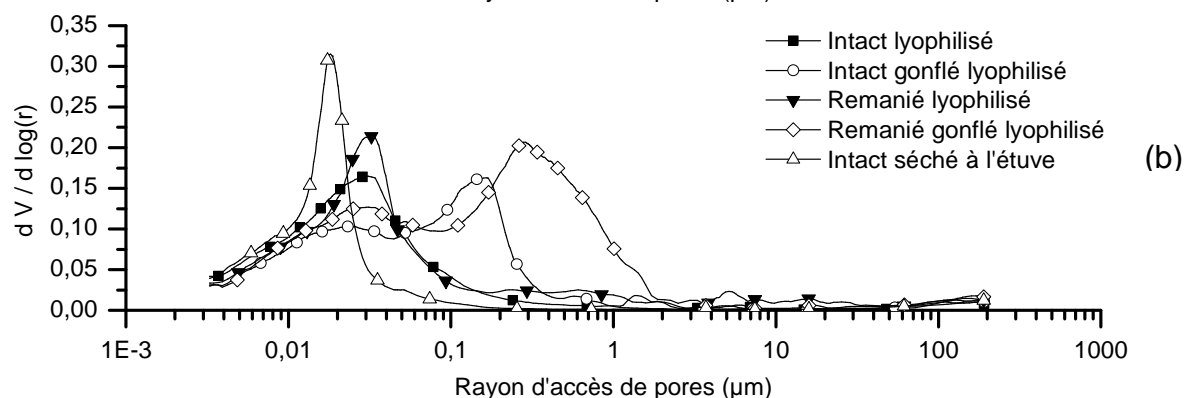
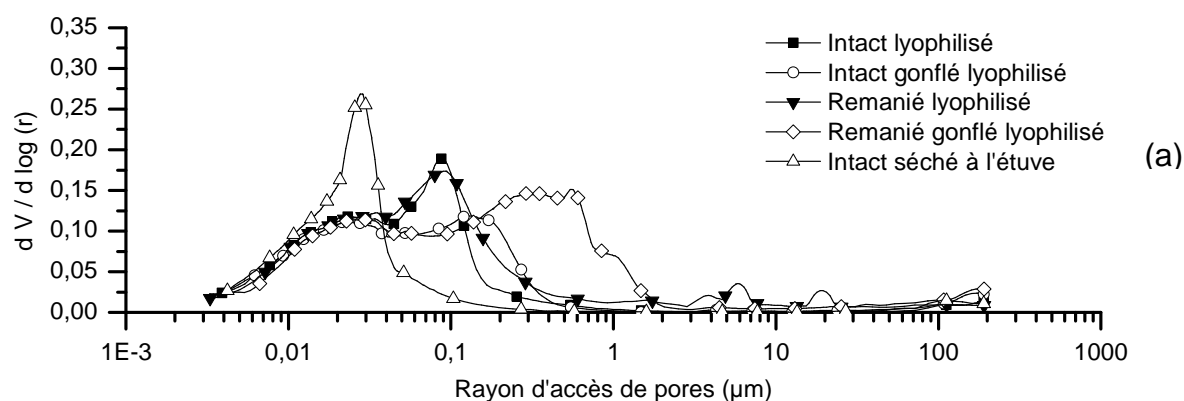
Les trois niveaux de AP, se différenciant par leurs compositions minéralogiques et leurs microstructures, ne présentent pas le même comportement vis-à-vis du gonflement.

Tableau 2.5 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des Argiles Plastiques

Formation	APS	APM	API
Echantillon intact, état initial			
Volume poreux total (mm ³ /g)	180	168	158
Rayons moyens des familles (μm)	0,025 / 0,09	0,03	0,007 / 0,4
après gonflement			
Volume poreux total (mm ³ /g)	182	196	232
Rayons moyens des familles (μm)	0,025 / 0,15	0,03 / 0,15	0,01 / 1,5
Echantillon remanié, état initial			
Volume poreux total (mm ³ /g)	223	191	225
Rayons moyens des familles (μm)	0,025 / 0,09	0,03	0,01 / 0,5
après gonflement			
Volume poreux total (mm ³ /g)	268	312	264
Rayons moyens des familles (μm)	0,025 / 0,4	0,03 / 0,3	0,01 / 1,7

Les remarques suivantes peuvent être tirées de l'analyse du Tableau 2.5 :

- à l'état intact (état initial), APS (Figure 2.6a) présente une distribution bimodale avec deux familles de pores intra-agrégat et API (Figure 2.6c) présente une distribution bimodale avec deux familles de pores dont une intra-agrégat et une inter-agrégats tandis que APM (Figure 2.6b) présente une distribution unimodale avec une seule famille de pores intra-agrégat ;
- à l'état remanié (état initial), les trois niveaux présentent une distribution de pores similaire ou quasi similaire à celle des échantillons intacts, mais avec une augmentation du volume poreux total résultant du remaniement ;



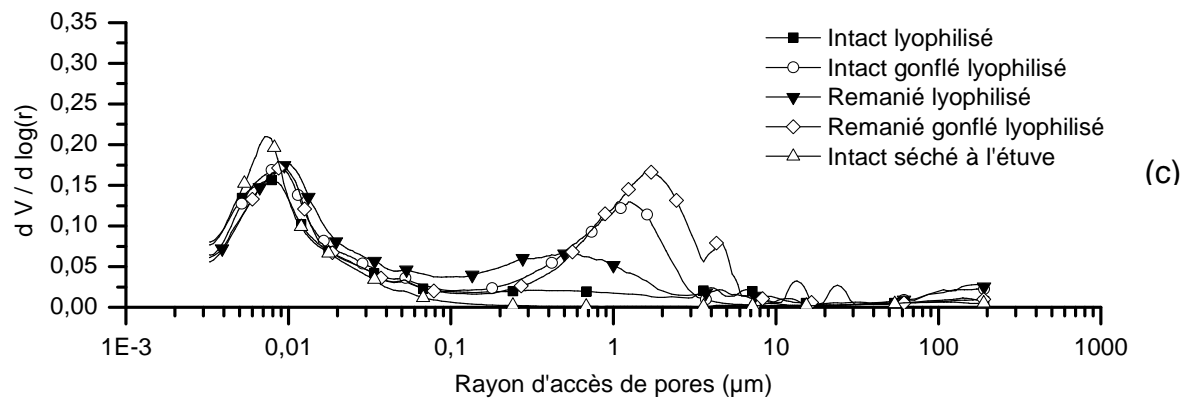


Figure 2.6 : Courbes de distribution des rayons de pores (a : APS ; b : APM ; c : API)

- après gonflement, le volume poreux de l'échantillon APS intact ne varie quasiment pas. Mais le rayon moyen de la deuxième famille de pores intra-agrégat passe de 0,09 μm à 0,15 μm . Par contre, après gonflement, l'échantillon APS remanié augmente nettement de volume (20 %) et on observe que la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande augmente vers la taille d'une famille de pores inter-agrégats (centrée à 0,4 μm) (Figure 2.6a). Pour l'échantillon APM intact ou remanié, le gonflement fait apparaître une nouvelle famille de pores inter-agrégats (de rayons 0,15 μm pour APM intact et 0,3 μm pour APM remanié) (Figure 2.6b). Dans le cas d'API, le gonflement conduit à une forte augmentation des rayons de la famille de pores inter-agrégats préexistante (passant de 0,4 μm à 1,5 μm pour API intact et de 0,5 μm à 1,7 μm pour API remanié) (Figure 2.6c) ;
- après gonflement, les trois niveaux, intacts ou remaniés, présentent une distribution bimodale avec deux familles de pores bien individualisées. Ces courbes bimodales correspondent à une structure en agrégats naturels.

Les observations au microscope électronique à balayage des états intact et remanié, avant et après gonflement, illustrent les résultats obtenus en porosimétrie au mercure.

Les photos prises sur APS, à l'état intact, montrent une microstructure relativement aérée formée par des petits grains (environ 1 μm) de quartz jointifs, assemblés en amas de 10 μm à 20 μm qui contribuent à rigidifier quelque peu le squelette du matériau. Ces amas sont reliés entre eux par des agrégats argileux (Figure 2.7a). Cette structure ressemble à la structure de MBA où la calcite occupe la place du quartz (Audiguier et al. 2008). Cette microstructure subit peu de changement au cours du gonflement (Figure 2.7b).

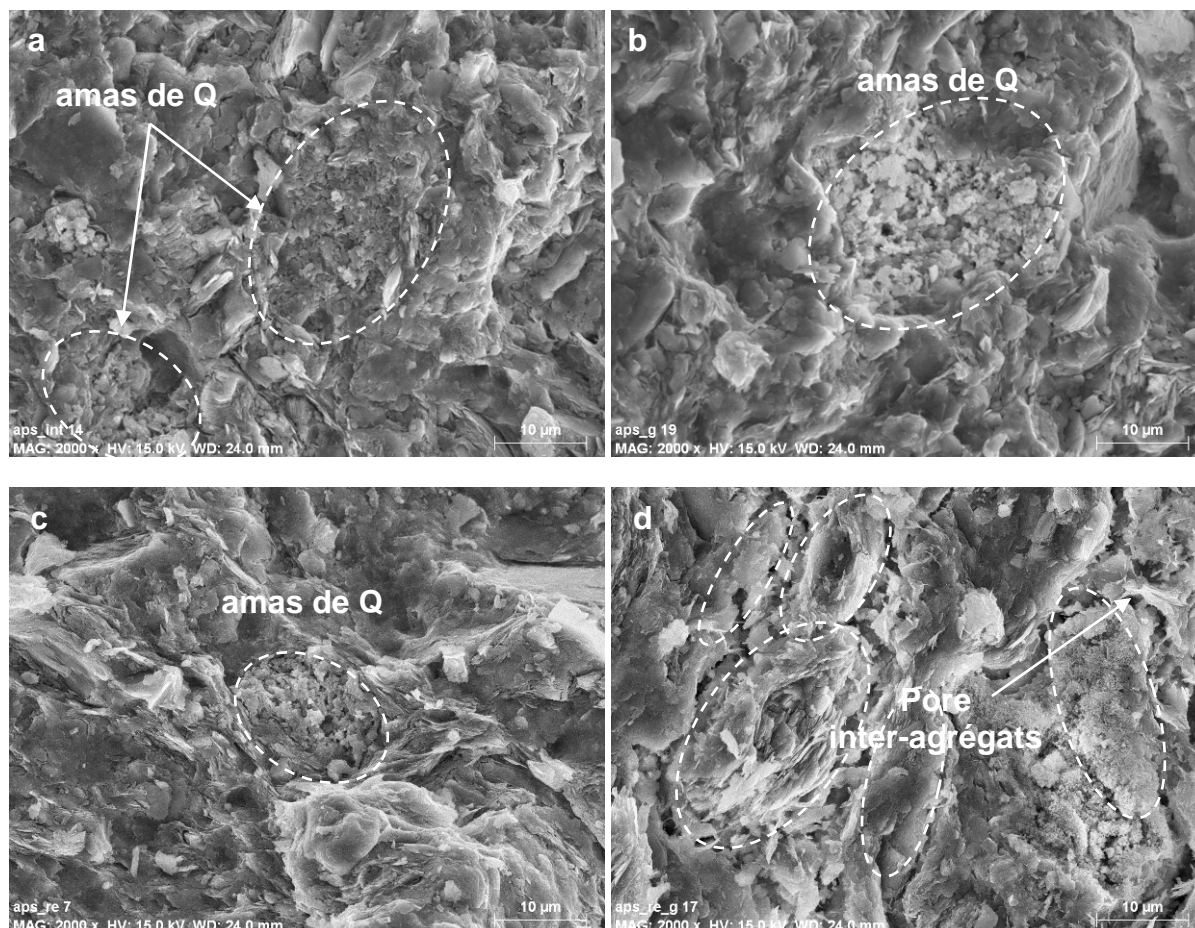


Figure 2.7 : Photos au MEB APS : Echantillon intact : a) état initial, b) après gonflement ; Echantillon remanié : c) état initial, d) après gonflement.

L'échantillon remanié, avant gonflement, présente une microstructure où des amas de grains coexistent avec des grains isolés. Cette microstructure est peu différente de celle de l'échantillon intact. Au cours du gonflement un réseau poreux bidimensionnel apparaît, responsable de la famille de pores inter-agrégats mesurée en porosimétrie au mercure.

Pour APM, à l'état intact et à l'état remanié, avant gonflement, on observe une microstructure relativement compacte où les agrégats ne sont pas bien individualisés. Elle est formée d'une matrice argileuse dans laquelle sont noyés des grains de quartz dispersés (Figure 2.8a, c). Après gonflement, des pores inter-agrégats apparaissent montrant un processus de division en agrégats. L'échantillon remanié présente alors un espace poral plus important que celui de l'échantillon intact après gonflement (Figure 2.8d).

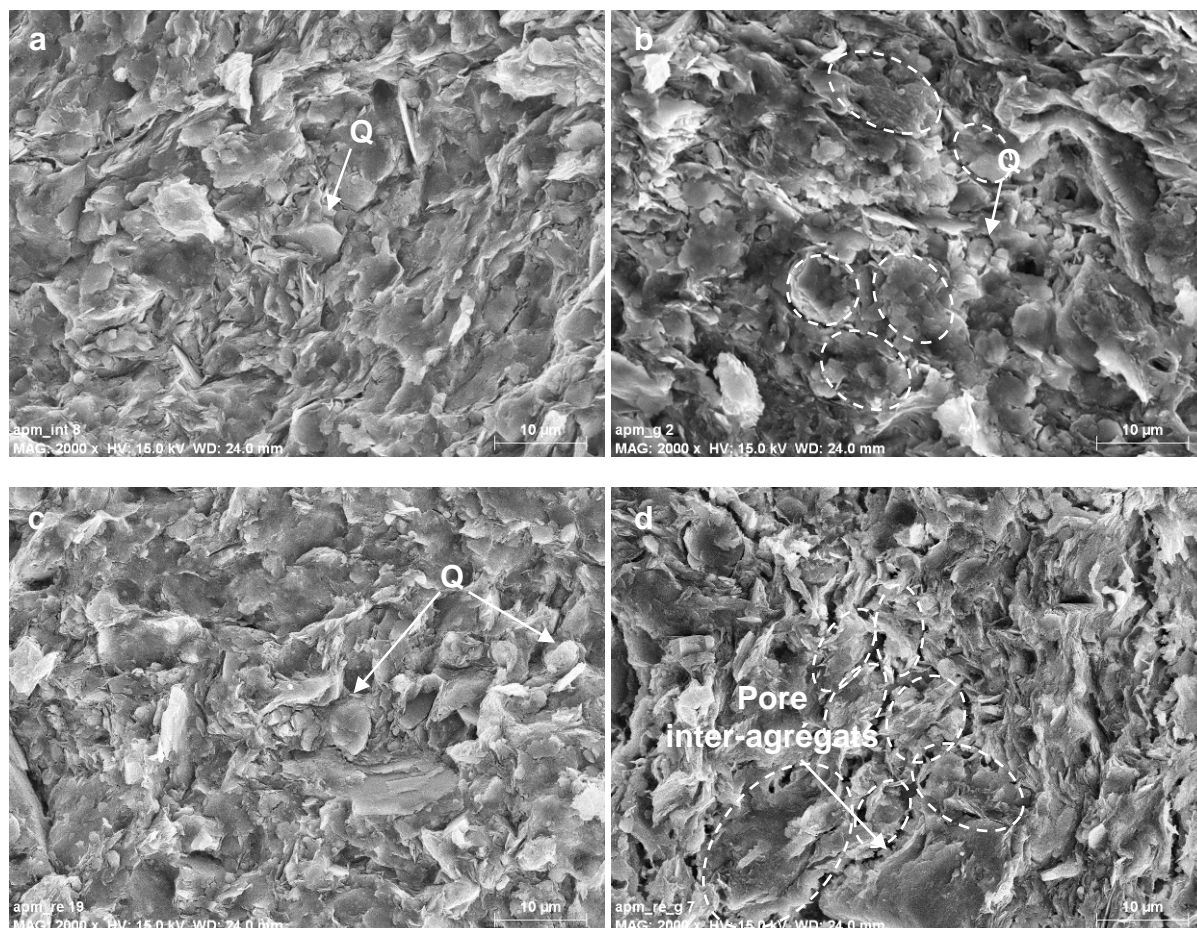
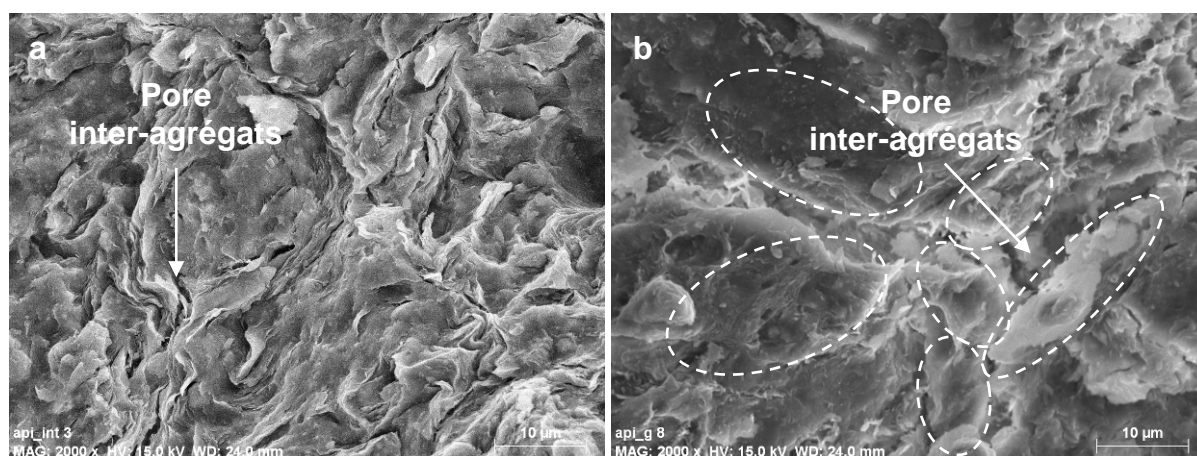


Figure 2.8 : Photos au MEB APM : Echantillon intact : a) état initial, b) après gonflement ; Echantillon remanié : c) état initial, d) après gonflement.

Pour API, à l'état intact, avant gonflement, on observe une microstructure en agrégats séparés par des pores inter-agrégats de taille inférieure à 1 µm. La matrice argileuse, dans laquelle sont noyés des grains de quartz épars, est très compacte (Figure 2.9a). A l'état remanié, l'observation au MEB ne montre pas de différences significatives (Figure 2.9c). Après gonflement, les échantillons intact et remanié présentent une porosité de taille plus importante, avec des pores inter-agrégats de plusieurs microns d'extension (Figure 2.9b, d).



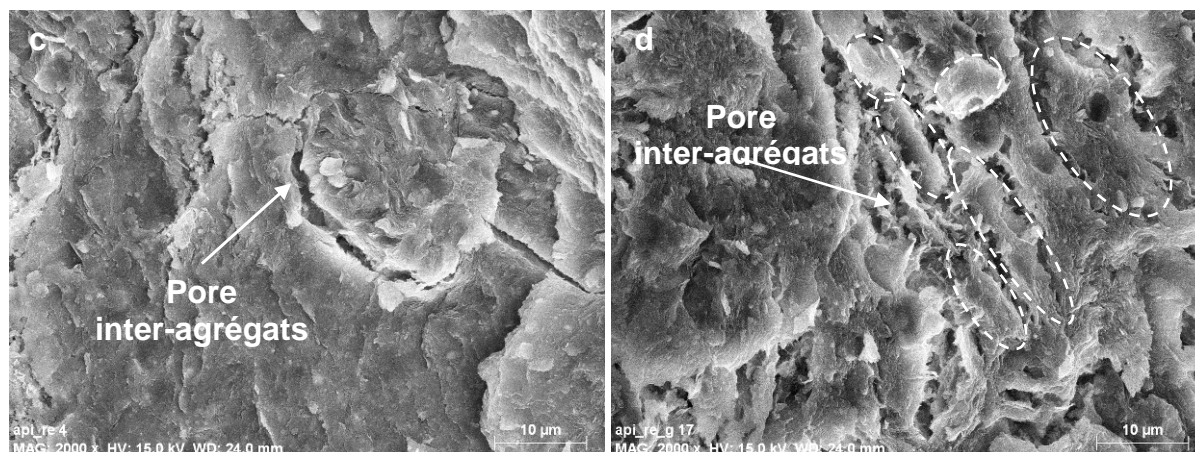


Figure 2.9 : Photos au MEB API : Echantillon intact : a) état initial, b) après gonflement ; Echantillon remanié : c) état initial, d) après gonflement.

3.3.2 Argile d'Héricourt

La Figure 2.10 présente les résultats des essais porosimétriques au mercure obtenus sur l'argile d'Héricourt à l'état naturel avant et après gonflement. Le résultat sur l'échantillon obtenu après un séchage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures est aussi présenté dans cette figure. La Figure 2.10a montre que le volume poreux accessible au mercure est d'environ 0,30 cm³/g pour l'échantillon naturel. Ce volume augmente à 0,39 cm³/g dans l'échantillon après gonflement (24 %) et diminue à 0,16 cm³/g dans l'échantillon après séchage à l'étuve (47 %). Les courbes de distribution de taille des pores dans la Figure 2.10b permettent l'analyse de la microstructure du sol. Dans l'échantillon naturel, deux familles de pores ont été observées : une famille de pores intra-agrégat centrée vers 0,015 µm et une famille de pores inter-agrégats centrée vers 0,25 µm. Le gonflement a augmenté le rayon d'accès des pores inter-agrégats jusqu'à 0,9 µm (le rayon d'accès des pores intra-agrégat n'ayant pas changé). Ceci explique l'augmentation du volume total des pores de l'échantillon gonflé (Figure 2.10a). Pour l'échantillon naturel séché à l'étuve, une seule famille de pores a été observée : la famille des pores intra-agrégat centrée vers 0,015 µm. La famille des pores inter-agrégats a été complètement détruite par ce séchage excessif qui conduit à la diminution du volume total des pores de l'échantillon séché à l'étuve (Figure 2.10a).

La Figure 2.11 présente les photos au MEB de l'échantillon naturel avant et après gonflement. Les observations au MEB illustrent les résultats obtenus par l'essai porosimétrique au mercure. Pour l'échantillon naturel à l'état initial, les agrégats argileux naturels ont été observés et plusieurs pores inter-agrégats d'environ 1 µm de diamètre peuvent également être observés (Figure 2.11a). La structure des agrégats argileux naturels formée par les particules argileuses est également visible dans cette figure. La Figure 2.11b montre que, après gonflement libre, les particules argileuses de cet échantillon sont un peu plus séparées qu'avant et la taille des pores inter-agrégats augmente. Les pores inter-agrégats supérieurs à 1 µm peuvent être observés dans cette photo, ce qui est compatible avec le résultat de l'essai porosimétrique au mercure (Figure 2.10b).

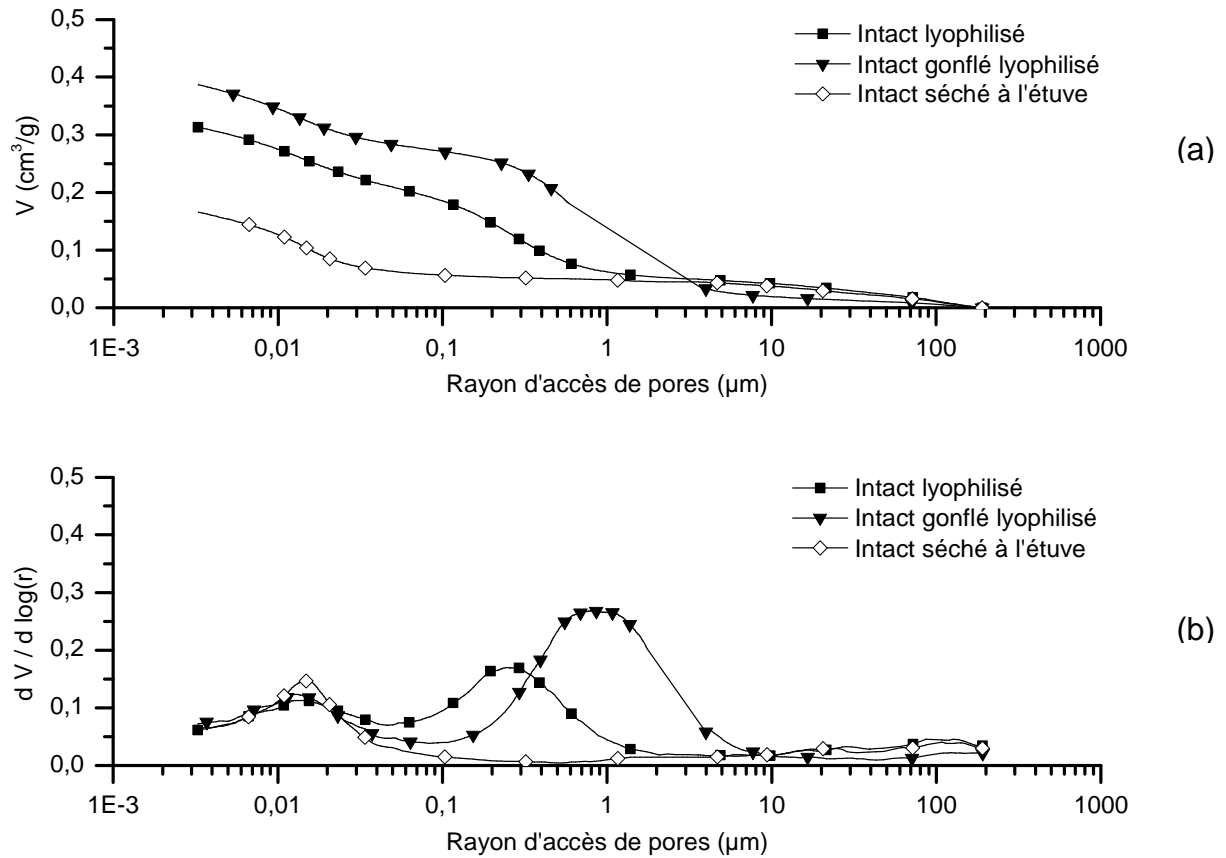


Figure 2.10 : Courbes porosimétriques de l'échantillon naturel

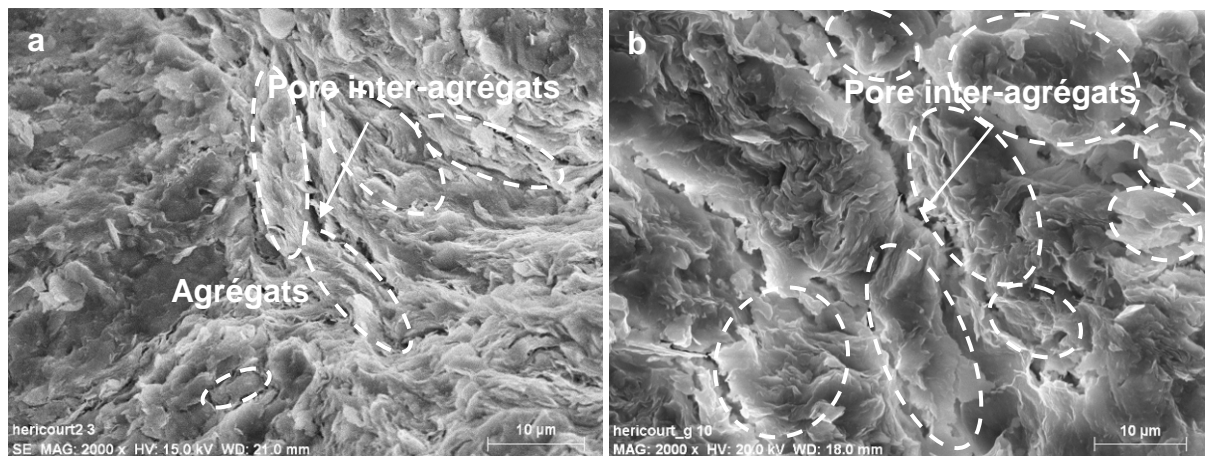


Figure 2.11 : Photos au MEB de l'échantillon naturel : a) Etat initial, b) Après gonflement

Pour l'échantillon remanié au laboratoire, le volume poreux cumulé de cet échantillon est d'environ 0,22 cm³/g (Figure 2.12a). Ce volume augmente de 56 %, jusqu'à 0,34 cm³/g dans l'échantillon après gonflement. Seule une famille de pores intra-agrégat centrée vers 0,03 μm a été observée dans l'échantillon remanié (Figure 2.12b). Le gonflement a augmenté la taille d'une partie des pores intra-agrégat et créé des pores inter-agrégats plus grands dont les rayons sont proches de 0,35 μm dans l'échantillon gonflé, ce qui correspond à une augmentation du volume total des pores de l'échantillon remanié gonflé (Figure 2.12a).

La Figure 2.13 présente les images au MEB de l'échantillon remanié avant et après gonflement libre. Des agrégats argileux n'ont pas été observés dans l'échantillon avant gonflement et seuls quelques pores 2D très petits peuvent être observés (Figure 2.13a). Cette photo montre que la structure de l'échantillon remanié est une structure de matrice argileuse compacte. Après gonflement, la Figure 5b montre que les particules argileuses de l'échantillon remanié sont plus séparées qu'avant et une structure d'agrégats argileux a été retrouvée. Des pores inter-agrégats d'environ 1 μm de diamètre peuvent être observés dans cette photo, ce qui est cohérent avec le résultat de l'essai porosimétrique au mercure (Figure 2.12b).

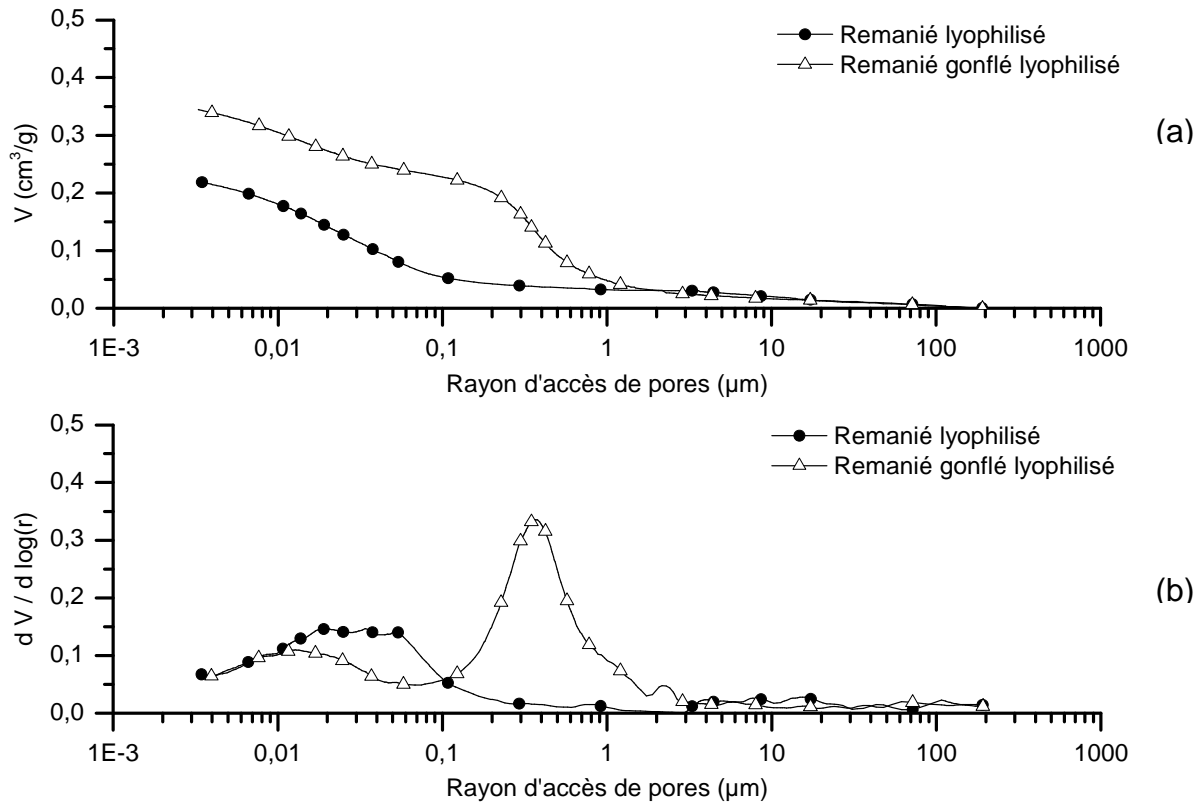


Figure 2.12 : Courbes porosimétriques de l'échantillon remanié

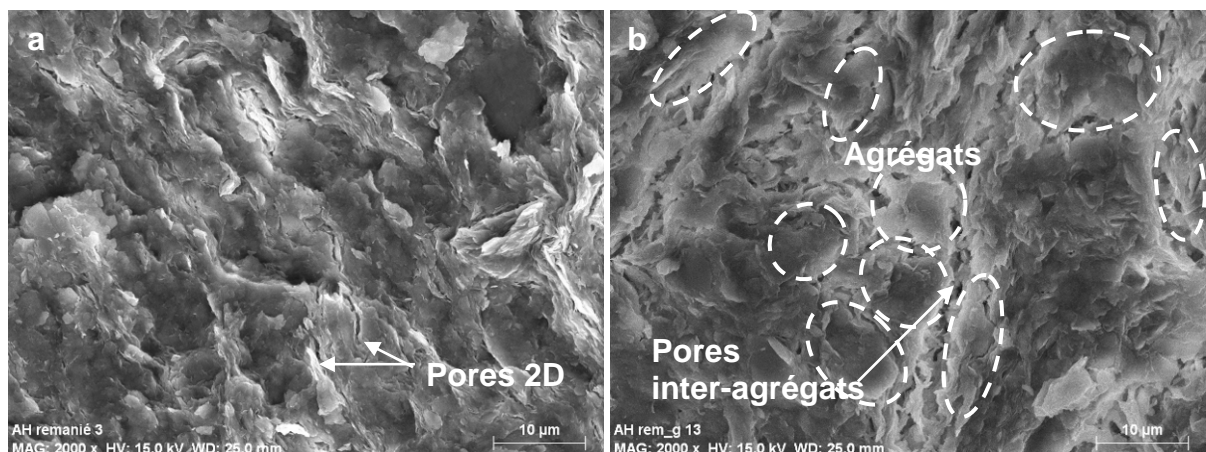


Figure 2.13 : Photos au MEB de l'échantillon remanié : a) Etat initial, b) Après gonflement

Pour l'échantillon compacté, le volume poreux total est d'environ 0,21 cm³/g (Figure 2.14a). Ce volume augmente plus de deux fois jusqu'à 0,47 cm³/g dans l'échantillon après

gonflement. Une famille de pores inter-agrégats compactés centrée vers $10\text{ }\mu\text{m}$ et une famille de pores intra-agrégat centrée vers $0,015\text{ }\mu\text{m}$ ont été observées dans l'échantillon compacté (Figure 2.14b). Le gonflement a augmenté le volume des pores inter-agrégats naturels et un peu le volume des pores inter-agrégats compactés (la taille moyenne de pores inter-agrégats naturels et de pores inter-agrégats compactés est de $2,5\text{ }\mu\text{m}$). Ceci conduit à une augmentation du volume total des pores (Figure 2.14a). Les changements de taille des pores intra-agrégats n'ont pas été observés. En plus, la comparaison entre la courbe de distribution de tailles des pores de l'échantillon compacté (Figure 2.14b) et celle de l'échantillon naturel (Figure 2.10b) nous permet de constater que la procédure de préparation du sol compacté (séchage à l'air libre, broyage et tamisage à 2 mm , compactage) a détruit partiellement la famille de pores inter-agrégats naturels et créé une nouvelle famille de pores appelée inter-agrégats artificiels ou compactés.

La Figure 2.15 présente les images au MEB de l'échantillon compacté avant et après gonflement libre. La Figure 2.15a montre que l'échantillon compacté de l'argile d'Héricourt est constitué de grands agrégats argileux compactés. La taille de ces agrégats est supérieure à $100\text{ }\mu\text{m}$, ce qui est lié à la procédure de préparation, par séchage à l'air libre, tamisage à 2 mm et compactage. Des pores inter-agrégats artificiels de $5\text{ }\mu\text{m}$ à $10\text{ }\mu\text{m}$ ont été observés dans cette photo, ce qui est compatible avec le résultat de l'essai porosimétrique au mercure (Figure 2.14b). La Figure 2.15b se concentre sur un agrégat de l'échantillon compacté, une structure de matrice argileuse a été observée. La microstructure de l'échantillon compacté a complètement changé après mouillage : des agrégats argileux naturels créés à partir des agrégats primaires compactés et des pores inter-agrégats d'environ $5\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre ont été observés (Figure 2.15c, d). La comparaison entre l'échantillon de la Figure 2.15a et celui de la Figure 2.15c montre que les particules argileuses dans l'échantillon après gonflement sont plus séparées que dans l'échantillon initial.

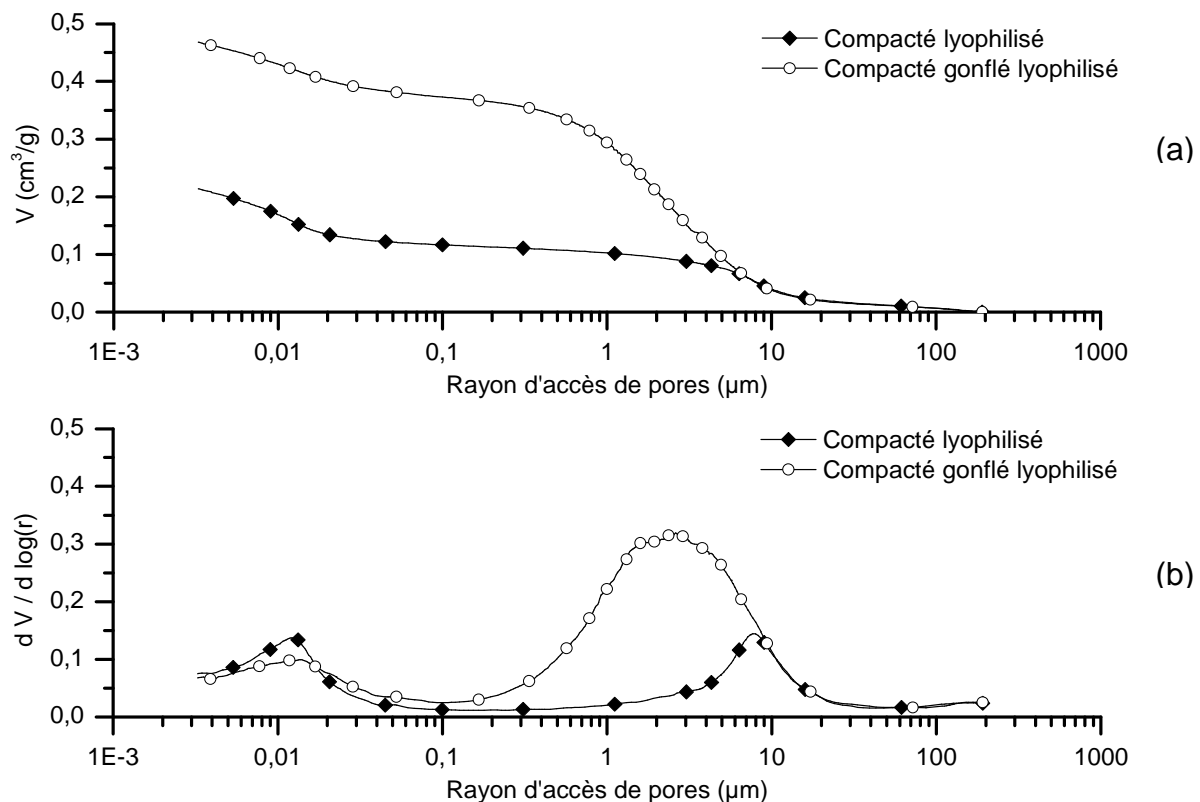


Figure 2.14 : Courbes porosimétriques de l'échantillon compacté

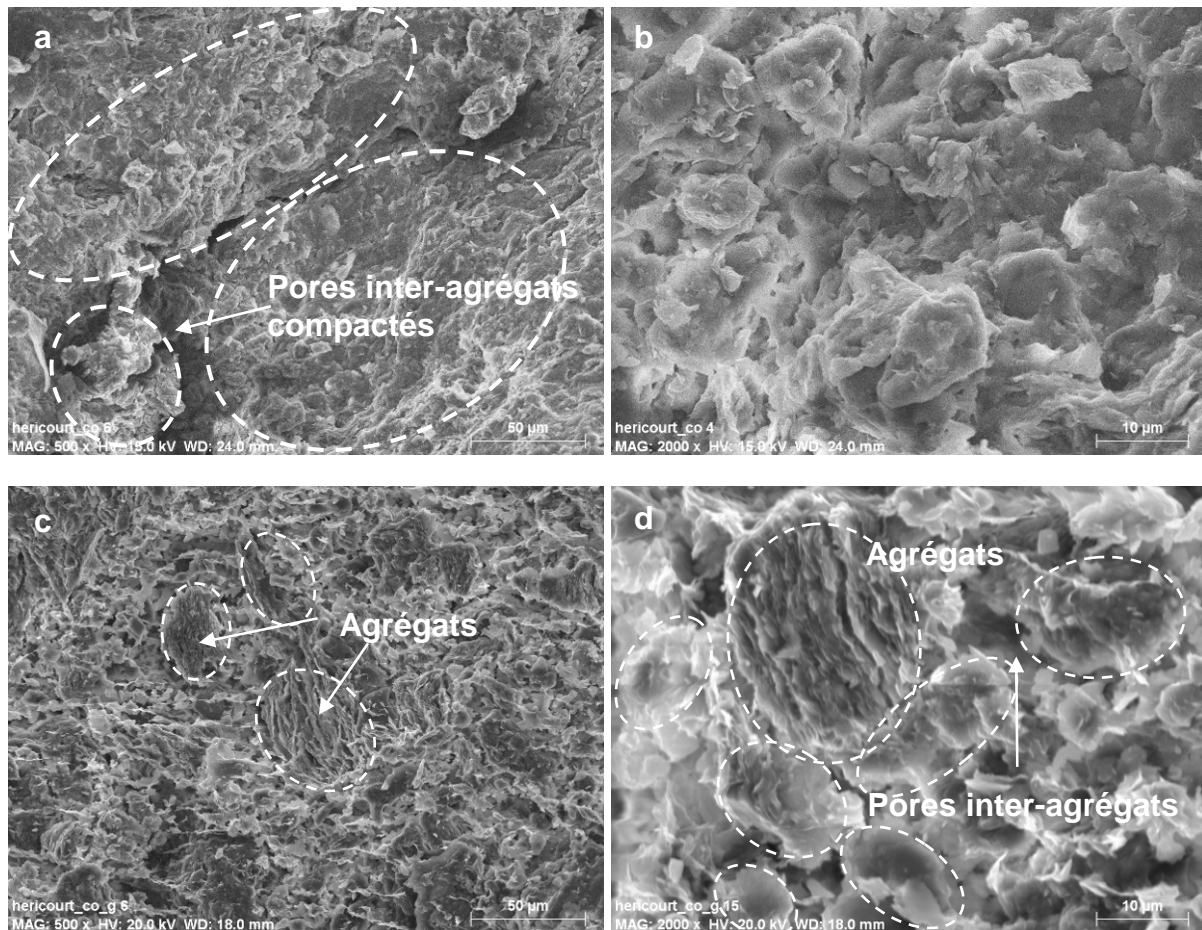


Figure 2.15 : Photos au MEB de l'échantillon compacté : a, b) Etat initial, c, d) Après gonflement

4. Analyse du gonflement par un modèle microstructural

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes, qualitatives ou quantitatives, de prédiction du gonflement des sols argileux. On trouve que la plupart des modèles quantitatifs de prévision du gonflement sont basés sur les paramètres géotechniques comme la teneur en eau, la masse volumique sèche, la limite de liquidité, l'indice de plasticité, la capacité d'échange cationique (Vijayvergiya et Ghazzaly 1973 ; Johnson et Snethen 1978 ; Yilmaz 2006). Les modèles permettant de décrire la microstructure qui est une propriété importante dans le gonflement des sols argileux sont restés essentiellement qualitatifs, ce qui fait que la prévision du gonflement à partir des microstructures est limitée. Dans son travail sur le gonflement des sols fins compactés, Ferber (2005) a introduit deux paramètres simples, l'indice des vides des agrégats ou intra-agrégat (e_{ag}) et l'indice des vides inter-agrégats (e_{i-ag}), pour décrire la microstructure d'un sol compacté. D'où, il a pu proposer une méthodologie de prévision du gonflement de ce type de sol soumis à des variations d'état hydrique en se basant sur ces deux paramètres. Dans cette partie, la méthodologie développée par Ferber (2005) est adaptée aux sols argileux intacts saturés. Les résultats des essais de gonflement libre des sols intacts étudiés dans ce mémoire de thèse sont utilisés pour tester ce modèle.

Les paramètres du modèle microstructural développé par Ferber (2005) pour les sols fins compactés non saturés sont d'abord présentés. Ils sont ensuite adaptés à l'étude du gonflement libre des sols intacts saturés pour comparer le phénomène du gonflement à l'échelle microstructurale de ces deux types de sol.

4.1. Modèle d'organisation microstructurale des sols fins compactés non saturés (Ferber 2005)

Le modèle d'organisation microstructurale des sols fins compactés non saturés, développé par Ferber (2005), est basé sur la définition d'une particule primaire générique qui est appelée « agrégat », la description quantitative de la porosité de cette particule primaire et la description quantitative des vides dans le reste du volume. Pour ce modèle microstructural, l'indice des vides global du sol est la somme des indices des vides des agrégats ou intra-agrégat (e_{ag}) et des vides inter-agrégats (e_{i-ag}) :

$$e = e_{ag} + e_{i-ag} \quad [2.1]$$

D'après la définition de la particule primaire générique dans le modèle, toute l'eau d'un sol non saturé est supposée être localisée dans la fraction argileuse et plus précisément au sein des agrégats. Et l'hypothèse principale du modèle est que les agrégats sont saturés.

Dans les conditions de cette hypothèse, le volume des vides intra-agrégats peut être assimilé au volume d'eau, V_w , au sein de l'agrégat, ce qui permet de déterminer un indice des vides intra-agrégats (e_{ag}).

$$e_{ag} = \frac{V_w}{V_s} = \frac{w\rho_s}{\rho_w} \quad [2.2]$$

où ρ_s : la masse volumique moyenne des particules solides

ρ_w : la masse volumique de l'eau

w : la teneur en eau massique globale du sol.

De plus, dans ce modèle, on admet que le volume total de l'échantillon est la somme du volume des agrégats (V_{ag}), et du volume des vides inter-agrégats (V_{i-ag}). On peut donc quantifier un indice des vides inter-agrégats, assimilé à l'indice d'air (e_{air}). Il faut noter que, dans ce modèle, V_{ag} est la somme des volumes des particules argileuses, non argileuses et du volume d'eau intra-agrégat.

$$e_{i-ag} = e_{air} = \frac{V - V_{ag}}{V_s} = e - \frac{w\rho_s}{\rho_w} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 - \frac{w\rho_s}{\rho_w} \quad [2.3]$$

où V : le volume total de l'échantillon

ρ_d : la masse volumique sèche globale de l'échantillon

e : l'indice des vides global de l'échantillon.

Dans les travaux de Ferber (2005), ce modèle a été bien appliqué pour décrire les phénomènes associés à l'humidification des sols fins compactés à l'échelle microscopique, en particulier dans la description de l'évolution de chacun des deux paramètres microstructuraux au cours de l'humidification qui sont l'indice des vides des agrégats et l'indice des vides inter-agrégats.

La première application de ce modèle dans les travaux de Ferber (2005) porte sur l'étude du gonflement libre de l'argile verte de Romainville compactée. L'exploitation des résultats dans le diagramme de l'indice d'air initial en fonction de l'indice des vides global de l'échantillon après gonflement ($e_{air,i}/e$) conduit à l'observation suivante : à teneur en eau initiale constante, l'indice des vides final présente une relation linéaire avec l'indice d'air initial qui est l'indice des vides inter-agrégats. Un modèle de microstructure a été établi à partir de cette observation. Ce modèle se compose des deux paramètres des droites de régression qui sont en relation avec les modifications de la microstructure causées par l'humidification : l'ordonnée à l'origine des droites représente l'indice des vides final des agrégats, alors que la pente est un paramètre de quantification de la perte de volume inter-agrégats.

En outre, l'interprétation de Ferber (2005) conduit à décrire le gonflement libre à l'échelle macroscopique comme la résultante de deux variations de volume à l'échelle microstructurale : une augmentation de l'indice des vides des agrégats ou intra-agrégat et une diminution de l'indice des vides inter-agrégats compactés.

4.2. Adaptation à l'étude du gonflement libre des sols intacts

Avant d'appliquer le modèle d'organisation microstructurale des sols argileux compactés non-saturés aux sols argileux intacts saturés, il faut noter que les niveaux de microstructure argileuse et les terminologies correspondantes utilisées dans le modèle d'organisation microstructurale ci-dessus et dans ce mémoire de thèse ne coïncident pas. Le terme « *vides inter-agrégats* » utilisé dans le modèle d'organisation de la microstructure des sols compactés correspond, dans ce mémoire, aux pores inter-agrégats artificiels qui sont des vides entre les agrégats artificiels constitués de particules argileuses ($r > 4 \mu m$). Le terme « *vides des agrégats ou intra-agrégat* » utilisé dans le modèle correspond aux pores de taille $r < 4 \mu m$ qui se composent des pores inter-agrégats qui sont des vides entre les agrégats naturels constitués de particules argileuses et aussi des pores intra-agrégats qui sont des vides entre les particules argileuses à l'intérieur des agrégats naturels. On notera alors dans cette partie que l'indice des vides des agrégats ou intra-agrégat (e_{ag}) dans le modèle est équivalent à l'indice des vides de taille $r < 4 \mu m$ ($e_{<4\mu m}$) et que l'indice des vides inter-agrégats (e_{i-ag}) dans le modèle est équivalent à l'indice des vides de taille $r > 4 \mu m$ ($e_{>4\mu m}$).

Puisque les sols intacts étudiés sont saturés, les pores inter-agrégats qui sont des vides entre les agrégats naturels et les pores intra-agrégats qui sont des vides entre les particules argileuses à l'intérieur des agrégats naturels peuvent être supposés remplis d'eau. Dans ces conditions, le volume des vides de taille $r < 4 \mu m$ peut être assimilé au volume d'eau, V_w , ce qui permet de déterminer l'indice des vides de taille $r < 4 \mu m$ ($e_{<4\mu m}$).

$$e_{<4\mu m} = \frac{V_w}{V_s} = \frac{w\rho_s}{\rho_w} \quad [2.4]$$

L'indice des vides de taille $r > 4 \mu m$ ($e_{>4\mu m}$) peut être ensuite relié à l'indice des vides global de l'échantillon (e) et à l'indice des vides de taille $r < 4 \mu m$ ($e_{<4\mu m}$).

$$e_{>4\mu m} = e - \frac{w\rho_s}{\rho_w} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 - \frac{w\rho_s}{\rho_w} \quad [2.5]$$

Le modèle ci-dessus est appliqué pour décrire les phénomènes de gonflement libre des sols intacts saturés à l'échelle microscopique dans cette partie. Pour cela, les résultats des essais de gonflement libre des Argiles vertes de Romainville intactes dans Yigzaw (2009) sont utilisés dans l'application du modèle. D'abord, l'influence de l'état initial sur le gonflement libre des Argiles vertes de Romainville est décrite en détail. Ensuite, les observations sont élargies à d'autres sols étudiés dans cette thèse.

Le Tableau 2.6 regroupe les résultats des essais de gonflement libre des Argiles vertes de Romainville intactes (Yigzaw 2009). On note que les deux échantillons E-AVR-0 et E-AVR-1, prélevés à différentes profondeurs, présentent des compositions minéralogiques quasi identiques.

Tableau 2.6 : Taux de gonflement des Argiles vertes de Romainville intactes (Yigzaw 2009)

Echantillon	w_o (%)	ρ_d (Mg/m ³)	e_o	$\Delta H/H_o$ (%)
E-AVR-0	24,9	1,61	0,76	18,8
	28	1,53	0,86	16,2
	26	1,62	0,75	15,5
	22,7	1,66	0,71	22,8
	23,8	1,66	0,71	23
	25,4	1,61	0,76	26,4
	25	1,60	0,76	26
E-AVR-1	25,3	1,63	0,75	27,5
	26,4	1,60	0,78	25,6
	22,4	1,72	0,65	27,8
	24,2	1,69	0,68	25
	24,7	1,67	0,71	24,1
	21,1	1,77	0,61	25,2
	24,9	1,61	0,77	18,5

La méthode la plus directe et la plus commune pour étudier l'influence de l'état initial, est de représenter le gonflement causé par l'humidification en fonction de la masse volumique sèche initiale (Figure 2.16) ou de la teneur en eau initiale (Figure 2.17).

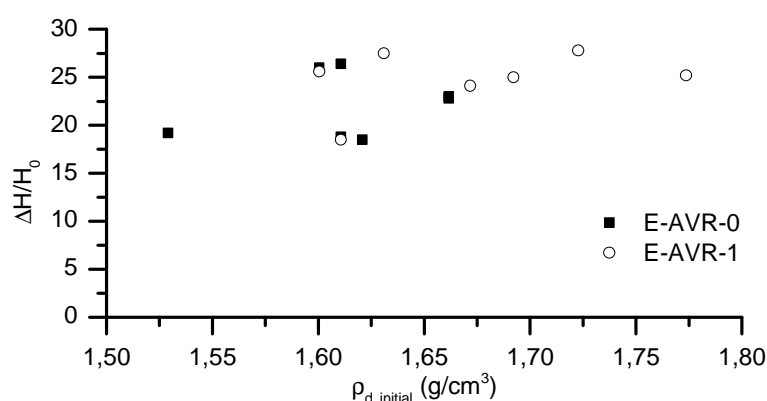


Figure 2.16 : Influence de la masse volumique sèche initiale sur les taux de gonflement libre

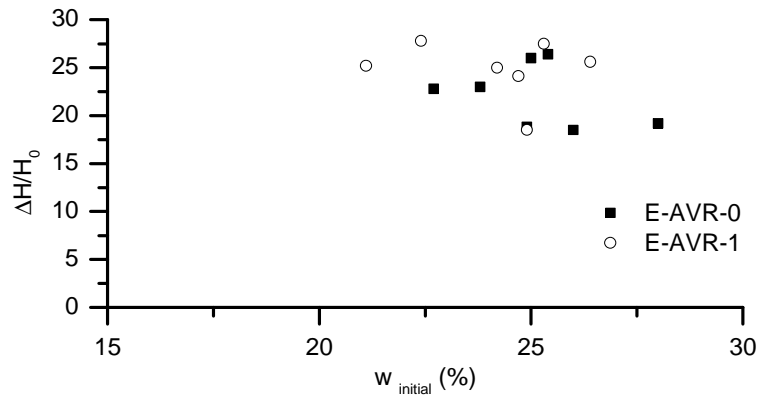


Figure 2.17 : Influence de la teneur en eau initiale sur les taux de gonflement libre

L'analyse des résultats ci-dessus conduit aux conclusions suivantes :

- Le taux de gonflement augmente lorsque la masse volumique sèche augmente (Figure 2.16) et le gonflement libre est d'autant plus fort que la teneur en eau initiale est faible (Figure 2.17). Il faut noter que, pour un sol saturé, la masse volumique sèche et la teneur en eau sont liées par la relation $w = \rho_w(1/\rho_d - 1/\rho_s)$
- Si on veut modéliser l'influence de la teneur en eau initiale ou de la masse volumique sèche sur le gonflement il faudra trouver une loi qui de toute évidence n'est pas linéaire.

Si l'indice des vides initial et l'indice des vides final des échantillons d'Argiles vertes de Romainville sont présentés dans un diagramme, on peut trouver une relation linéaire qui peut être intéressante pour une modélisation du gonflement libre des sols intacts.

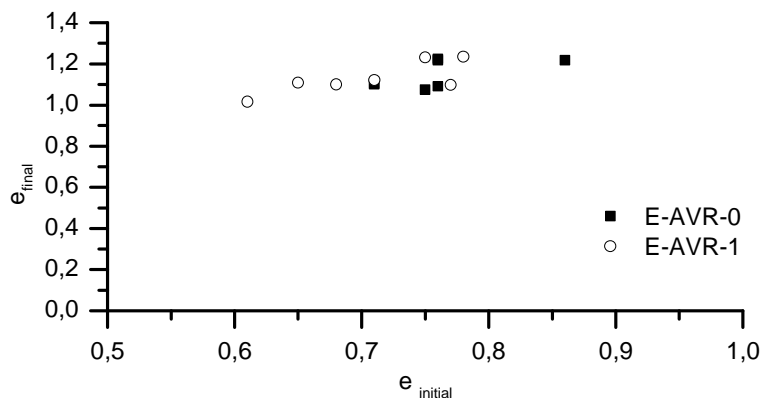


Figure 2.18 : Influence de l'indice des vides initial sur l'indice des vides final

Dans la Figure 2.18, une relation linéaire apparaît entre l'indice des vides final et l'indice des vides initial des échantillons. Il faut noter que dans les argiles intactes saturées ou quasi saturées, les « vides inter-agrégats dans le modèle » correspondent aux pores inter-agrégats artificiels de taille $r > 4 \mu m$ qui n'existent quasiment pas ($e_{>4\mu m} \approx 0$) (Figure 2.20). Le vide total correspond donc aux « vides intra-agrégat dans le modèle » ou à des pores de taille $r < 4 \mu m$ (qui sont les pores inter-agrégats et les pores intra-agrégats dans les sols intacts saturés). Autrement dit, plus le volume des pores de taille $r < 4 \mu m$ initial est important, plus la quantité d'eau pouvant être absorbée sera importante, ce qui conduit à penser que le surplus

d'eau absorbée par un échantillon de fort indice des vides par rapport à un échantillon de faible indice des vides, sera une eau contenue dans les pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ (Figure 2.19).

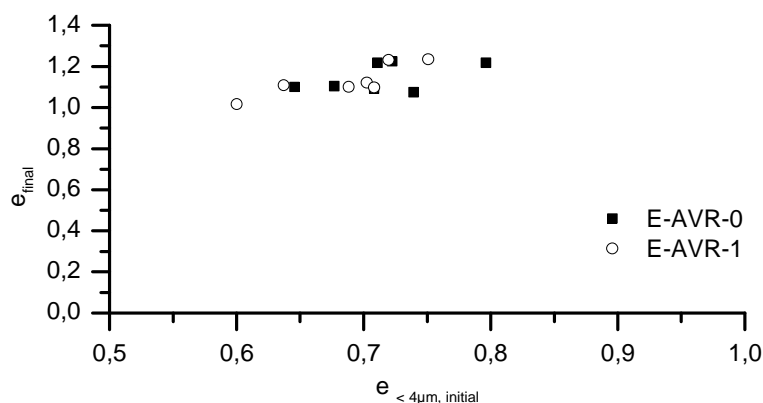


Figure 2.19 : Influence de l'indice des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de AVR

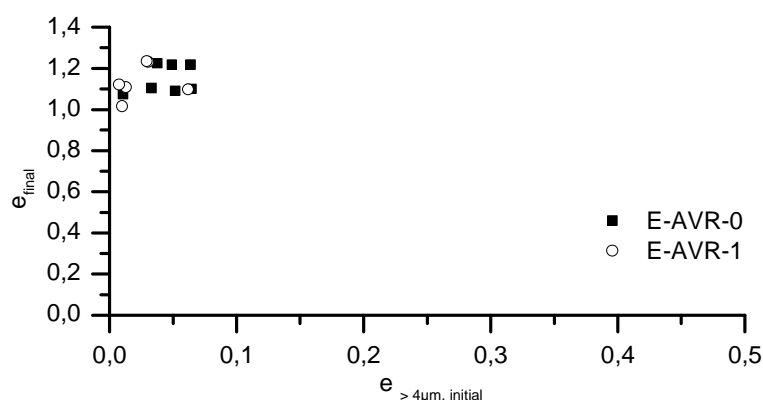


Figure 2.20 : Influence de l'indice des pores de taille $r > 4 \mu\text{m}$ sur l'indice des vides final de AVR

L'exploitation des essais de gonflement libre sur l'Argile verte de Romainville dans le diagramme $e_{<4\mu\text{m}, \text{initial}}/e$ conduit à l'observation que l'indice des vides final présente une relation linéaire avec l'indice des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ initial, ce qui présente par ailleurs l'intérêt pratique de présenter une relation linéaire avec l'indice des vides final si on veut modéliser le gonflement libre des sols argileux intacts saturés.

Pour vérifier cette observation, des mesures de porosimétrie au mercure avant et après gonflement libre sur trois échantillons d'Argile verte de Romainville ont été reprises dans Yigzaw (2009) (Tableau 2.7).

Tableau 2.7 : Indice des vides des échantillons étudiés en porosimétrie au mercure avant et après gonflement (Yigzaw 2009)

Echantillon	w_o (%)	e_o	w_f (%)	e_f
E-AVR-0	24,8	0,67	39,3	1,06
E-AVR-1	25,6	0,73	43,9	1,17
E-AVR-C	24,9	0,70	41,4	1,14

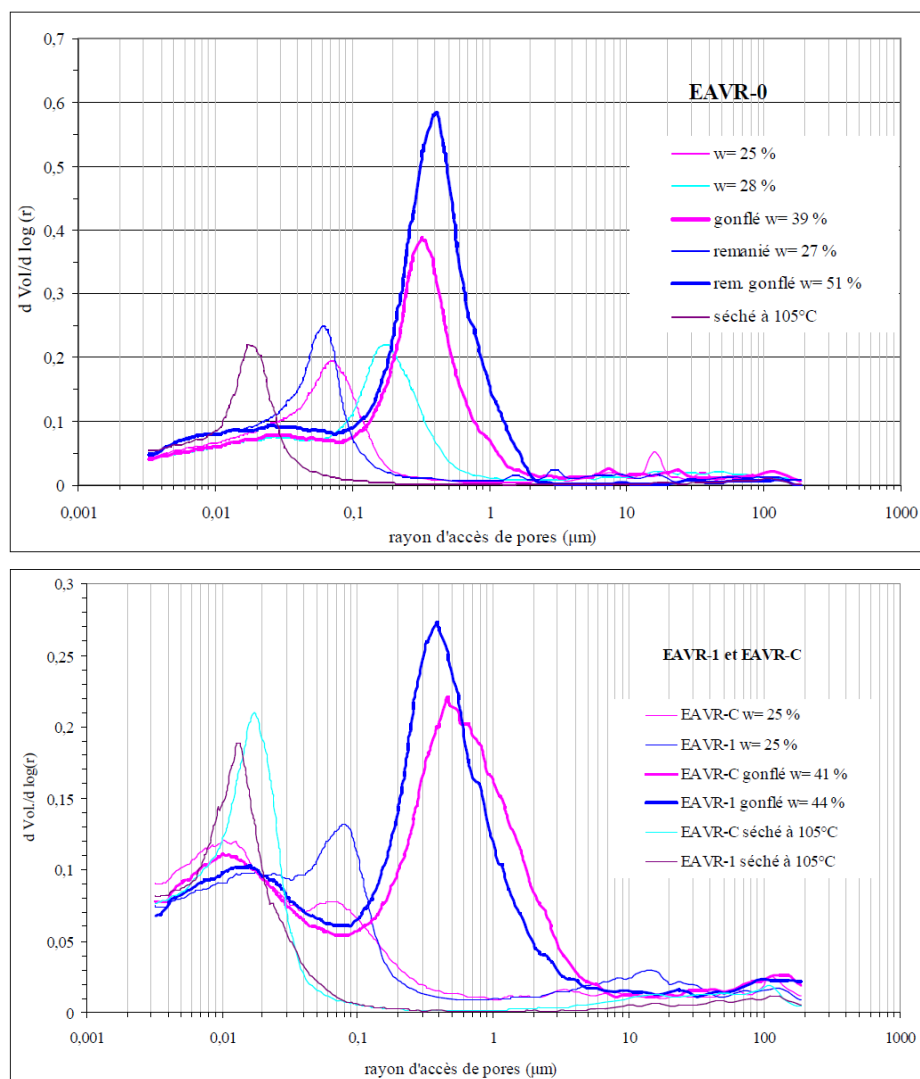
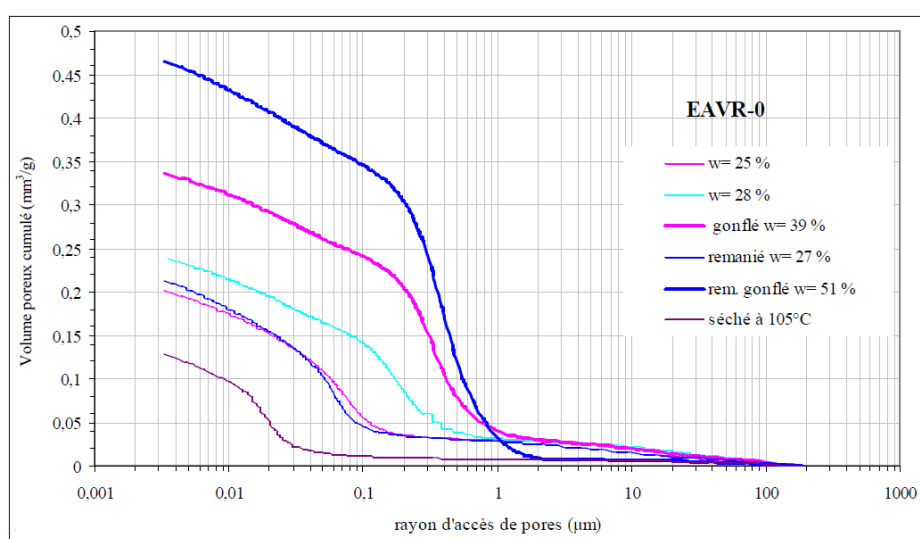


Figure 2.21 : Evolution de la distribution des tailles de pores causée par le gonflement libre (Yigzaw 2009)



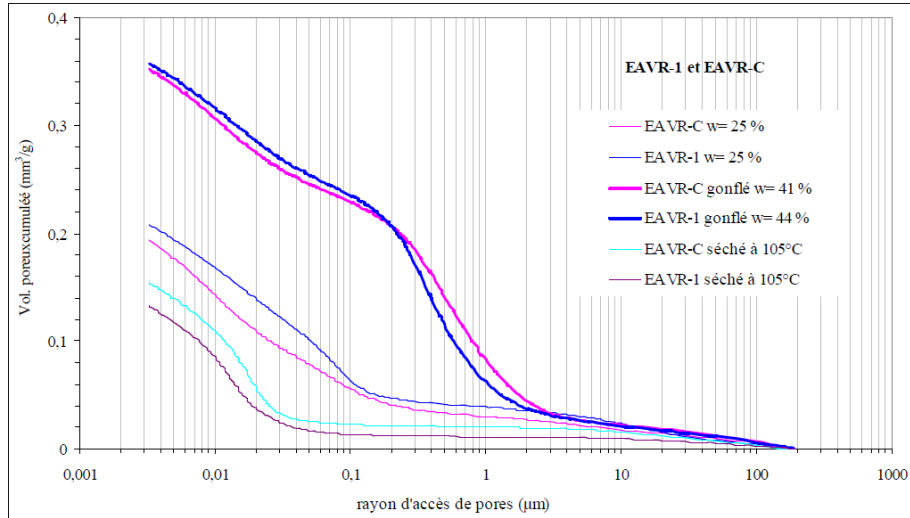


Figure 2.22 : Courbes porosimétriques de EAVR-0, EAVR-1 et EAVR-C (Yigzaw 2009)

Les courbes de distribution de tailles des pores avant et après humidification des échantillons d'Argile Verte de Romainville ont été présentées dans la Figure 2.21a, b. Pour les échantillons avant humidification, les courbes de distribution de tailles des pores permettent de distinguer ce qui pourrait être la porosité intra-agrégats ($r < 0,15 \mu\text{m}$) et la porosité inter-agrégats ($0,15 \mu\text{m} < r < 4 \mu\text{m}$) et il n'existe quasiment pas de porosité inter-agrégats artificielle ($r > 4 \mu\text{m}$).

La comparaison des courbes de distribution avant et après gonflement apporte des éléments supplémentaires à ces observations dans la mesure où les échantillons d'Argiles Vertes de Romainville présentent une distribution bimodale avec deux familles de pores intra-agrégat, de dimension $r < 0,15 \mu\text{m}$ avant humidification. La famille de pores intra-agrégat, de dimension la plus grande disparaît après humidification, une famille de pores inter-agrégats plus importante apparaissant, de dimension comprise entre $0,15$ et $4 \mu\text{m}$, avec une augmentation du vide total.

Les courbes porosimétriques au mercure en volumes cumulés (Figure 2.22a, b) permettent de déterminer l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ et l'indice des vides des pores de taille $r > 4 \mu\text{m}$. Dans ce cas, l'indice des vides des pores de taille $r > 4 \mu\text{m}$ donné par la porosimétrie au mercure ($e_{>4\mu\text{m},\text{poro}}$) doit être rapporté à l'indice des vides total pour pouvoir être comparé à l'indice des vides des pores de taille $r > 4 \mu\text{m}$ donné par le modèle ($e_{>4\mu\text{m},\text{modèle}}$). La détermination de cet indice, noté $e_{>4\mu\text{m},\text{poro}}$ est donnée par l'équation suivante.

$$e_{>4\mu\text{m},\text{poro}} = \frac{\left(\frac{V_{\text{cumulé}}}{m_s} \right)_{>4\mu\text{m}}}{\left(\frac{V_{\text{cumulé}}}{m_s} \right)_{\text{total}}} \times e \quad [2.6]$$

où e : l'indice des vides de l'échantillon

m_s : la masse du sol sec utilisé dans l'analyse porosimétrique au mercure

$(V_{cumul\bar{e}/m_s})_{>4\mu m}$: volume cumulé des pores de dimension supérieure à 4 μm donné par la porosimétrie au mercure

$(V_{cumul\bar{e}/m_s})_{total}$: volume cumulé total des pores donné par la porosimétrie au mercure.

L'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ ($e_{<4\mu m, poro}$) est alors déduit de $e_{>4\mu m, poro}$ et de l'indice des vides total (e).

$$e_{<4\mu m, poro} = e - e_{>4\mu m, poro} \quad [2.7]$$

Les mêmes indices peuvent être calculés d'après le modèle de microstructure et sont comparés avec les indices donnés par la porosimétrie dans la Figure 2.23.

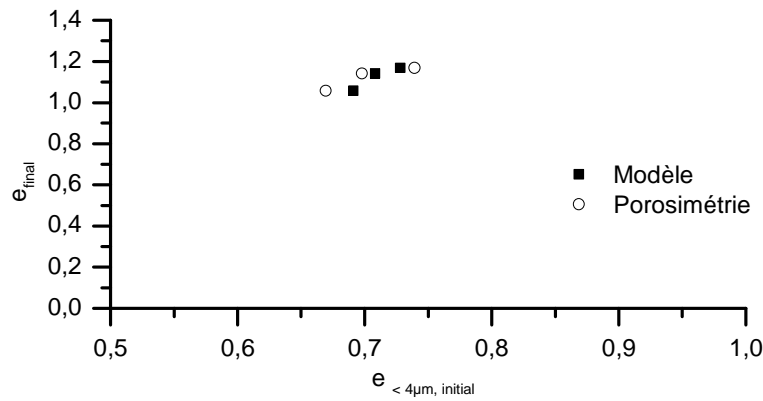


Figure 2.23 : Comparaison entre des indices des vides calculés d'après le modèle et déterminés à partir des essais porosimétrique au mercure

La comparaison des indices des vides, donnés par le modèle et donnés par la porosimétrie au mercure, permet de constater que l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ donné par la porosimétrie au mercure augmente avec l'indice des vides final dans les mêmes proportions que l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ donné par le modèle.

Pour apprécier l'observation sur l'influence des indices des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ sur les indices des vides final des sols intacts saturés au cours de gonflement libre, les résultats des essais de gonflement libre des autres sols étudiés dans ce mémoire de thèse ont été regroupés de manière à déterminer pour chacun d'entre eux la droite caractérisant l'état final.

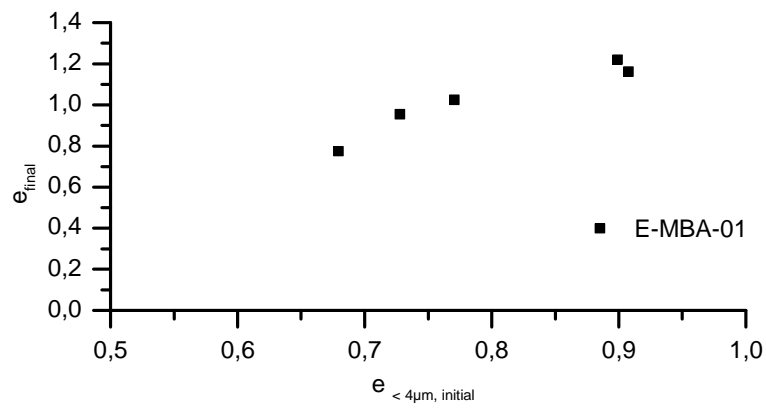


Figure 2.24 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ sur l'indice des vides final des Marnes Bleues d'Argenteuil

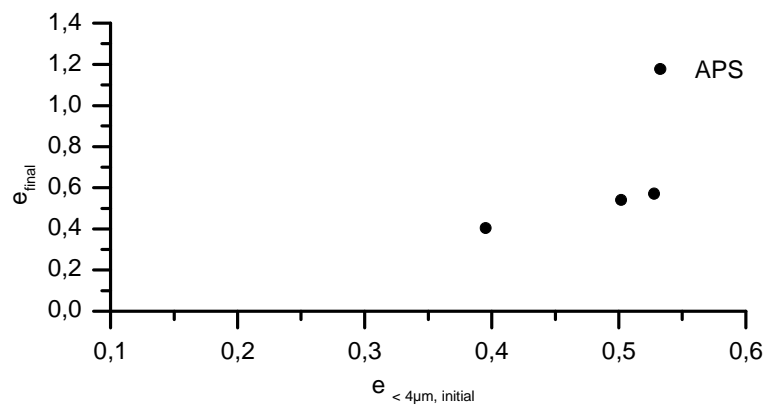


Figure 2.25 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ sur l'indice des vides final de APS

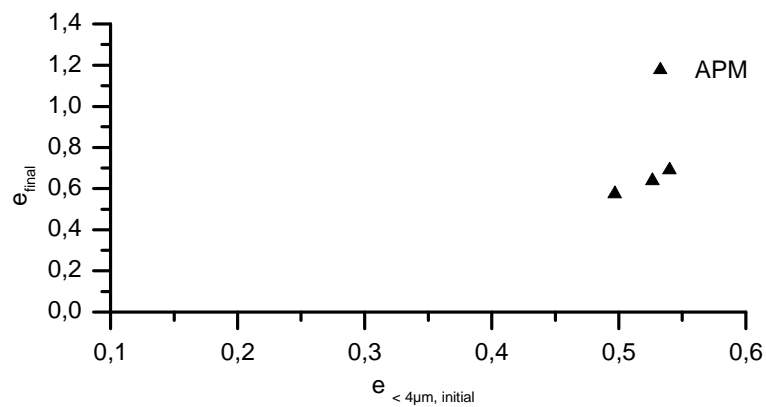


Figure 2.26 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ sur l'indice des vides final de APM

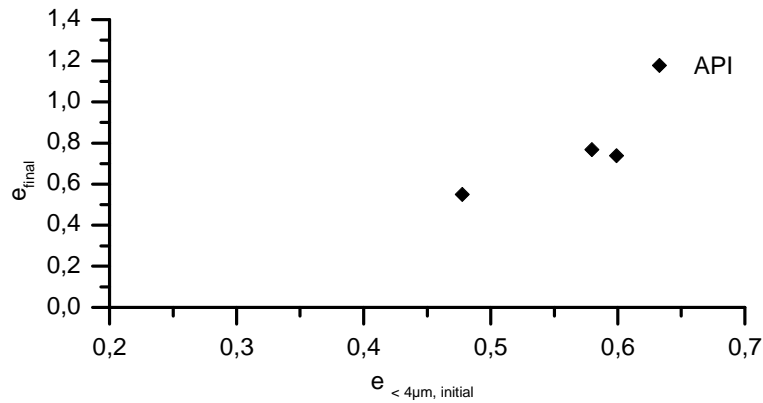


Figure 2.27 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ sur l'indice des vides final de API

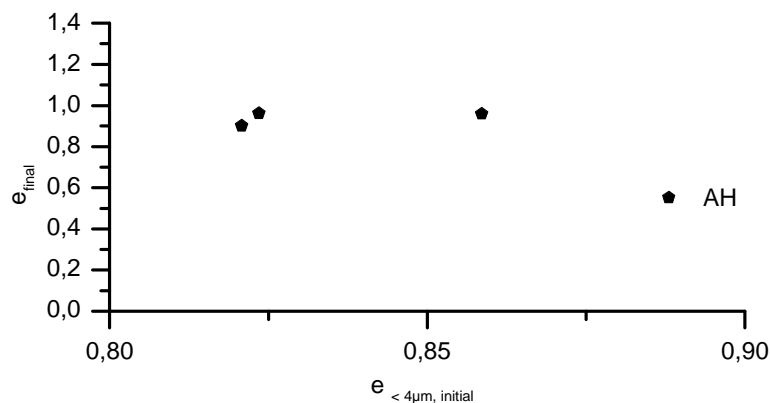


Figure 2.28 : Influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu m$ sur l'indice des vides final de AH

L'analyse des résultats des essais de gonflement libre réalisés sur les cinq sols qui sont présentés ci-dessus permet d'observer qu'une relation linéaire entre l'indice des vides final et l'indice des vides des pores de tailles $r < 4 \mu m$ peut exister comme pour les Argiles Vertes de Romainville ou ne pas exister. Il faut noter cependant le faible nombre de points disponibles pour discuter de ces relations ou de l'absence de relation.

4.3. Discussions

Comme indiqué dans les travaux de Ferber (2005) sur l'Argile Verte de Romainville compactée non-saturée, l'étude de l'influence de l'état initial sur le gonflement libre de l'Argile Verte de Romainville intacte saturée permet aussi de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser le modèle de microstructure pour exploiter et interpréter ce type d'essais. Cette approche donne la possibilité de prévisions du gonflement des sols intacts à l'échelle macroscopique à partir d'une description des phénomènes à l'échelle microscopique. A partir de ces résultats et de leur interprétation, on peut tirer les remarques suivantes :

- le gonflement libre mesuré à l'échelle macroscopique des sols intacts saturés résulte de l'augmentation du volume des pores de taille $r < 4 \mu m$ qui est en accord avec les observations par la porosimétrie et le MEB. Il faut noter qu'au cours de l'humidification des sols intacts, le volume des pores intra-agrégat ne change pas ou très peu, et donc l'augmentation de volume des pores de taille $r < 4 \mu m$ correspond au volume des pores

inter-agrégats naturels. Comparé aux sols compactés, d'après Ferber (2005), le gonflement libre mesuré à l'échelle macroscopique est la résultante de deux phénomènes contradictoires à l'échelle microscopique pour les sols compactés non-saturés : un gonflement des agrégats (des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$) et une diminution du volume inter-agrégats artificiels (des pores de taille $r > 4 \mu\text{m}$). Dans cette étude, pour AH compacté, le gonflement libre mesuré à l'échelle macroscopique est la résultante de deux phénomènes à l'échelle microscopique pour les sols compactés non-saturés : un gonflement des agrégats (des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$) et une diminution ou augmentation du volume inter-agrégats artificiels (des pores de taille $r > 4 \mu\text{m}$) avec un faible volume ;

- l'augmentation du volume des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ causée par l'humidification paraît proportionnelle à leur volume initial et final ;
- cette proportionnalité entre les volumes de vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ initial et les volumes final a des conséquences intéressantes, bien qu'elle reste mal expliquée, puisqu'elle est à l'origine d'une relation quasi linéaire caractérisant l'état final dans le diagramme $e_{<4\mu\text{m},i}/e$. Étant donné que l'état initial est lui-même caractérisé par une relation linéaire dans ce diagramme, l'influence de l'indice des vides des pores de taille $r < 4 \mu\text{m}$ sur le gonflement peut être décrite quantitativement avec des équations simples linéaires tirées du diagramme $e_{<4\mu\text{m},i}/e$.

5. Comparaisons entre les sols étudiés et conclusions

Ce chapitre a regroupé l'ensemble des essais de gonflement conduits sur les sols étudiés à l'état naturel, remanié ou compacté. Les essais de gonflement permettent de définir le potentiel de gonflement et la pression de gonflement des sols argileux : les Argiles Plastiques du Sparnacien et l'argile d'Héricourt. Il faut noter que les valeurs de ces paramètres sont fonction de l'état initial du sol (teneur en eau, masse volumique sèche).

L'étude des échantillons de AP et la comparaison avec l'étude des échantillons de AVR et MBA ont permis de confirmer le rôle de deux familles de facteurs dans les processus de retrait-gonflement des sols argileux :

- La composition minéralogique : les Smectites et interstratifiés Illite-Smectite favorisent le gonflement, ce qui n'est pas le cas de la Kaolinite. Le gonflement est contrarié par la présence de carbonates mais aussi de quartz, la présence de ces minéraux limitant l'influence des minéraux argileux. A l'état intact, le gonflement libre dépend du taux de carbonates ou de quartz ;
- La microstructure (voir aussi Tableaux I, II, III et V en Conclusion générale et perspectives) : pour un pourcentage en carbonates ou en quartz donné, la sensibilité au gonflement est plus importante pour le sol remanié au laboratoire que pour le sol intact. En effet, le remaniement détruit, au moins partiellement, des éléments de microstructures qui contrariaient le gonflement : ponts carbonatés entre agrégats argileux dans les sols argileux carbonatés, amas de grains de quartz insensibles au gonflement dans les sols argileux riches en quartz.

L'étude menée sur la prévision du taux de gonflement, en utilisant les modèles basés sur des paramètres de microstructure, faciles à déterminer, a montré que le gonflement peut être décrit quantitativement dans certains cas avec des équations simples linéaires tirées du diagramme $e_{<4\mu\text{m},i}/e$.

Chapitre 3 - *Analyse du retrait et de la fissuration des sols*

1. Introduction

D'après Holtz et Kovacs (1981) et Mitchell (1993), les forces capillaires associées à la perte d'humidité du sol dans l'atmosphère causent le retrait du sol. En cours de dessiccation, la succion se développe et augmente les contraintes effectives dans le sol. À son tour, le volume du sol commence à diminuer et les fissures se développent dans la masse de sol. La fissuration progresse avec l'augmentation de succion. Les sols à grains fins sont plus sensibles au développement de fissures que les sols à grains grossiers en raison de la présence de petits pores qui permettent le développement de fortes succions.

Pour caractériser le retrait du sol, on utilise généralement la limite de retrait ou la limite de retrait effective. En pratique, la limite de retrait d'un sol correspond à la teneur en eau pour laquelle le sol commence à se désaturer. Au dessus de cette valeur, la déformation volumique est fonction linéaire de la teneur en eau (Sitharam et al. 1995). Selon la norme AFNOR, il existe deux types d'essais pour déterminer la limite de retrait : un sur le passant à 400 μm du sol pour déterminer la « limite de retrait conventionnelle » et un autre sur le sol non remanié pour déterminer la « limite de retrait effective » (Bigot et Zerhouni 2000). Cette limite de retrait peut être déterminée à partir de la courbe de retrait, qui lie souvent l'indice des vides à la teneur en eau volumique et caractérise les variations de volume du sol au cours de la dessiccation. En théorie, la courbe de retrait ou le processus de retrait comprend 3 phases. La première phase correspond au domaine saturé du sol où le volume d'eau évaporée est compensé par une égale diminution du volume des vides internes (Yong et Warkentin 1975). La deuxième phase commence quand une part du volume d'eau occupant les vides a été expulsée et l'air pénètre dans le réseau poreux (point d'entrée d'air ou limite de saturation). Dans cette phase, la teneur en eau diminue et cause aussi la diminution du volume du sol ou son retrait, mais avec une amplitude qui devient de plus en plus faible et n'est plus proportionnelle à la variation de teneur en eau, jusqu'à devenir quasiment nulle. La troisième phase commence à la limite de retrait où le volume ne varie plus malgré le départ d'eau.

Quant à la fissuration accompagnant le retrait du sol, plusieurs études ont abouti à une meilleure connaissance des processus mis en cause mais la description morphologique des fissures qui en résultent reste souvent limitée à des situations particulières : vertisols (Hallaire 1988). D'après Perrier et al. (1995), la caractérisation de la structure des fissures est très importante pour l'évaluation des propriétés géotechniques du système sol-eau. Si la structure du réseau de fissures (taille, connectivité, branchement...) peut être déterminée, le comportement du sol à l'humidification-dessiccation peut être prédite. En outre, la description quantitative et la mesure du réseau de fissures peuvent être aussi utilisées conjointement avec la densité apparente pour calculer la variation de volume du sol pendant le séchage (Ringrose-Voase et Sanidad 1996). D'autres exemples de mesure des fissures peuvent être importants dans l'évaluation des dommages provoqués par ces fissures aux racines des plantes et à l'écoulement préférentiel de l'eau et des polluants éventuels dans le sous-sol (Wopereis et al. 1994). L'étude de la fissuration des sols argileux en cours de dessiccation est donc nécessaire.

Pour les sols argileux, le développement et l'ampleur de la fissuration de dessiccation résultent de l'interaction de nombreux facteurs, dont la teneur en argile et la minéralogie (Aitchinson et Holmes 1953 ; Yesiller et al. 2000), l'épaisseur du sol, la configuration de

surface, la vitesse de séchage, le temps de séchage total, la profondeur de la nappe phréatique, les cycles de mouillage-séchage (Plummer et Gostin 1981 ; Tang et al. 2007, 2008).

Dans la littérature, il y a deux techniques principales pour quantifier des fissures du sol. La première technique est de mesurer directement des fissures (Zein El Abidine et Robinson 1971 ; Lima et Grismer 1992). On utilise souvent des règles pour mesurer la largeur des fissures et des fils de faible épaisseur pour mesurer la profondeur des fissures. Cependant, la forme irrégulière et la géométrie complexe des fissures ne favorisent pas des mesures de longueur, largeur et profondeur précises. La deuxième technique, technique d'imagerie développée ces dernières années, est de plus en plus utilisée pour effectuer des mesures de fissures. Mi (1995), Miller et al. (1998) et Yesiller et al. (2000) ont décrit une approche de mesure des fissures par cette technique en présentant le facteur d'intensité de fissure (CIF) comme une description de l'étendue en surface de la fissuration. Cet indice CIF qui est défini comme le rapport de l'aire des fissures à la surface totale d'une masse de sol séché est actuellement beaucoup utilisé pour décrire les fissures à la surface du sol. Plusieurs programmes d'analyse et de traitement d'image ont également été développés pour aider à quantifier les fissures.

À ce jour, bien qu'un grand nombre de méthodes de mesure des fissures de surface du sol aient été utilisées, et que de nombreux résultats significatifs aient été obtenus dans ce domaine, le processus de fissuration n'est pas complètement compris. Ce chapitre tente d'apporter une contribution à cette question avec l'étude expérimentale de la fissuration des Argiles Plastiques réalisée à partir de l'observation de surfaces d'échantillons en cours de dessiccation en utilisant la technique d'imagerie.

L'étude comprend des essais de dessiccation sur des échantillons de trois niveaux d'Argiles Plastiques à l'état intact et remanié. L'objectif général de cette étude est d'apporter une contribution à la compréhension du processus de retrait et de chercher des variables contrôlant le processus de fissuration lors de la dessiccation des Argiles Plastiques à l'échelle macroscopique.

Dans la première partie, les dispositifs et les processus expérimentaux des essais de dessiccation des sols adoptés dans ce mémoire de thèse sont présentés. Ensuite, les résultats obtenus sur le retrait et la fissuration des Argiles Plastiques du Sparnacien sont présentés et analysés. Enfin, ces résultats sont comparés avec ceux des Argiles Vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil obtenus par Yigzaw (2009).

2. Protocoles d'essai

2.1. Dessiccation des Argiles Plastiques intactes

Des échantillons d'Argile Plastique de trois niveaux (APS, APM, API) sont d'abord taillés à partir des blocs de sol intact de 70 mm de diamètre et 24 mm d'épaisseur. Ils sont ensuite séchés à l'air libre jusqu'à équilibre de la teneur en eau dans l'environnement du laboratoire ($T = 22 \pm 1^\circ\text{C}$, et humidité relative $40 \pm 5 \%$). Après stabilisation de la teneur en eau, les échantillons sont humectés en les plaçant dans des dessiccateurs saturés en vapeur d'eau. Trois cycles de séchage-humidification ont été réalisés sur ces échantillons. Le retrait latéral ou surfacique et l'évolution au cours du temps de la fissuration des sols sont suivis et décrits à l'aide des photos de la surface de l'échantillon prises à intervalles réguliers par un appareil photo numérique. Pour cela, ces photos sont traitées de la façon suivante : d'abord, une délimitation de la surface de traitement pour l'ensemble des photos à traiter est réalisée, ce qui

permet d'avoir toujours la même surface initiale ; ensuite, la binarisation de la photo est réalisée pour transformer des photos couleur en noir et blanc ; enfin, le réseau de fissures est décrit par le pourcentage de surface occupé par les fissures (pixels) par unité de surface. Le retrait latéral est décrit par le pourcentage de surface occupé entre le cylindre de sol et l'anneau métallique. En plus, la teneur en eau des sols est suivie par pesée des échantillons tout au long du séchage.

2.2. Dessiccation des Argiles Plastiques remaniées au laboratoire

Les échantillons remaniés d'Argile Plastique de trois niveaux sont préparés à une teneur en eau d'environ 1,5 fois leur limite de liquidité. Ces sols sont d'abord mélangés avec de l'eau pour en faire une boue. Ensuite, ils sont mis en place à l'aide d'une table vibrante dans des moules en PVC de 185 mm de diamètre, huilés sur leurs faces intérieures pour faciliter le retrait ou avoir un retrait libre. Après la vibration, les éprouvettes avec des surfaces et des bords nets sont soumises au séchage à l'air libre avec une température et une humidité relative ambiantes respectivement de $22 \pm 1^\circ\text{C}$ et $40 \pm 5\%$.

Six épaisseurs et deux types de base différents sont utilisés pour les essais de dessiccation de ces sols remaniés. Les supports en téflon traités avec une substance hydrophobe avant la mise en place des échantillons (surfaces lisses) sont utilisés pour avoir un retrait libre. Dans le cas de retrait empêché, le séchage du sol se fait sur une surface rugueuse (avec des aspérités de 0,45 cm de hauteur et 0,5 cm de largeur espacées de 0,5 cm en 2D) (Yigzaw 2009).

Le retrait latéral et l'évolution au cours du temps de la fissuration du sol remanié sont suivis comme décrit précédemment pour des échantillons intacts. Tout au long du séchage, la teneur en eau du sol est suivie par pesée.

3. Résultats

3.1. Retrait et fissuration des Argiles Plastiques intacts

Le Tableau 3.1 précise les conditions initiales (diamètres et épaisseurs des échantillons) ainsi que la nature de la surface de base pour les essais de dessiccation sur les échantillons APS, APM et API intacts.

Tableau 3.1 : Observation de fissuration des éprouvettes de sols intacts
(+ : fissuration observée, - : fissuration non observée)

Echantillons	D = 70 mm, H = 24 mm (surface lisse)		
	1 ^{er} séchage	2 ^e séchage	3 ^e séchage
APS	-	-	-
APM	+	+	+
API	-	-	-

La Figure 3.1 présente deux courbes de retrait : une courbe de retrait total obtenue par la mesure de volume au volumètre à mercure (chapitre 1) et une courbe de retrait surfacique (ou latéral) obtenue par le traitement des photos de la surface des échantillons de trois niveaux d'Argiles Plastiques au cours de la dessiccation à l'air libre. De très légères différences apparaissent entre la limite de retrait déterminée à partir de la courbe de déformation totale ou à partir de la courbe de déformation latérale pour les trois échantillons APS, APM et API. Les limites de retrait de APS, APM et API sont d'environ 15-16 %, 16-17 % et 14-16 % respectivement. Cette comparaison confirme les valeurs de limite de retrait trouvées par la méthode utilisant de volumètre à mercure dans le chapitre 1.

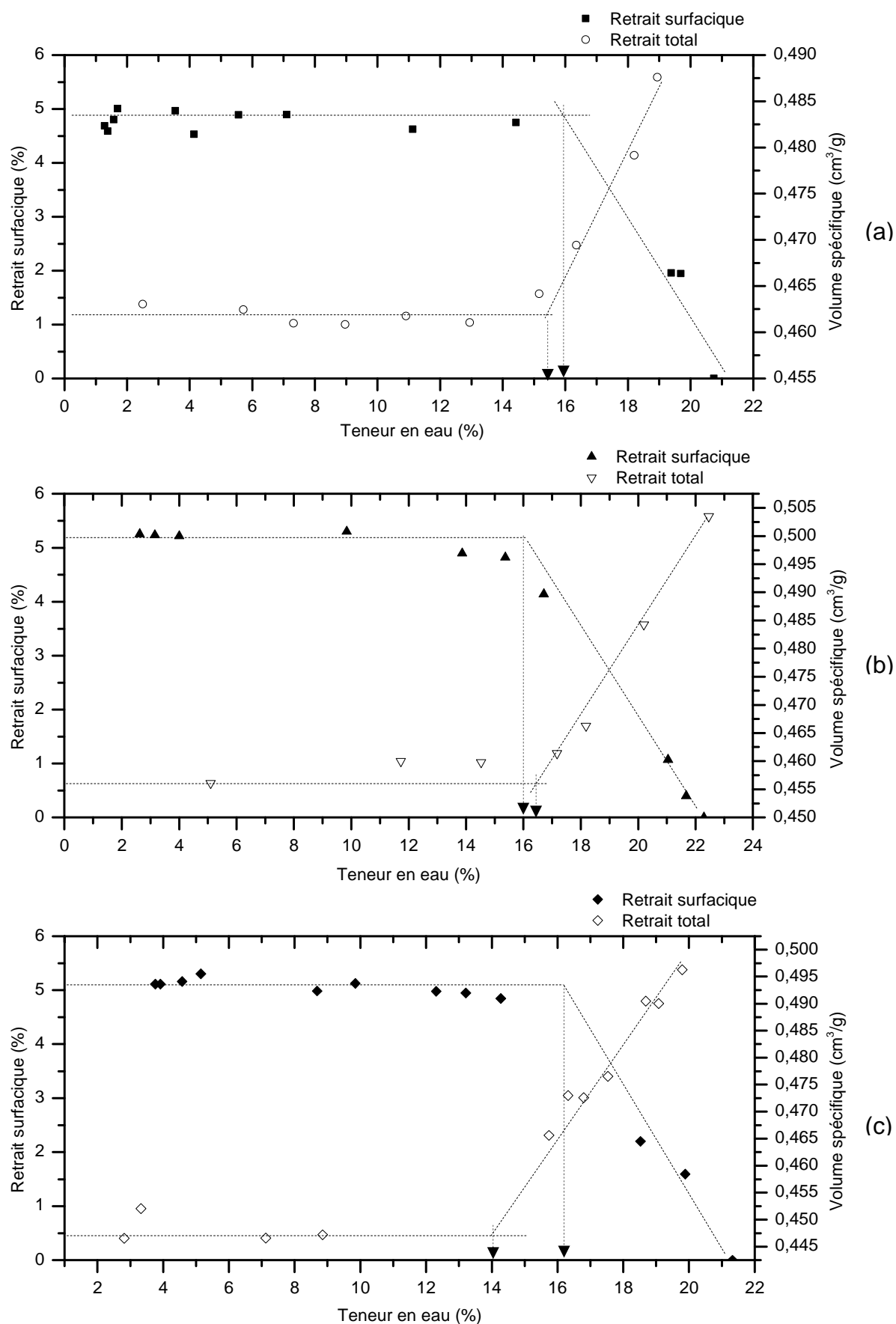


Figure 3.1 : Comparaison entre le retrait surfacique et le retrait total des Argiles Plastiques (a : APS, b : APM, c : API)

La Figure 3.2 présente les courbes de cinétique de dessiccation des Argiles Plastiques intactes lors du premier séchage. Les trois sols APS, APM et API ont des cinétiques de dessiccation similaires. Commencées à partir de teneurs en eau différentes, les cinétiques s'équilibrent à 1,3 % pour APS, 2,6 % pour APM et 3,8 % pour API.

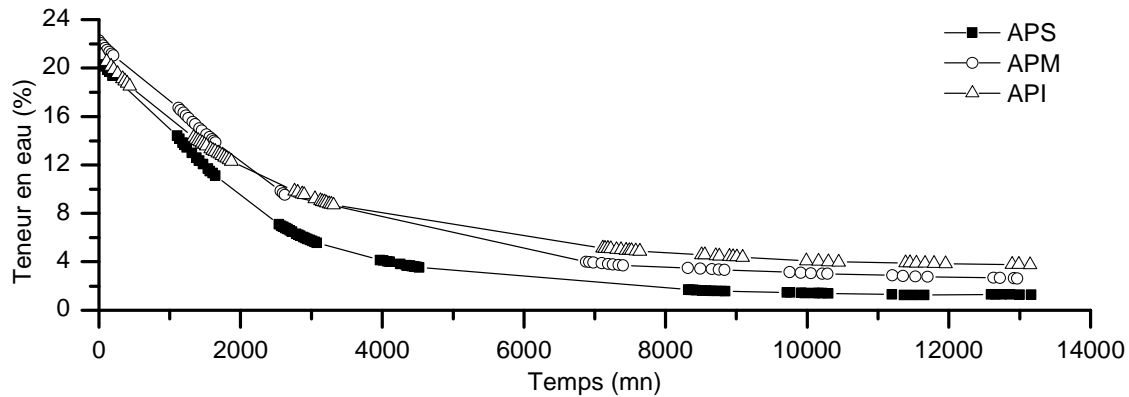
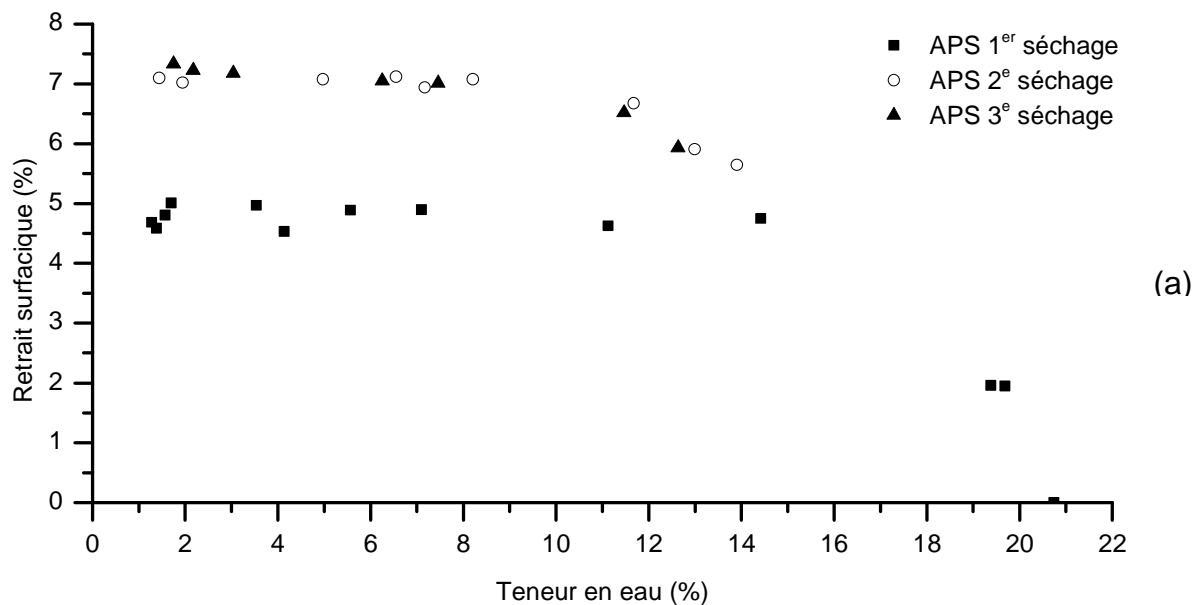


Figure 3.2 : Cinétique de dessiccation des Argiles Plastiques lors du 1^{er} séchage

La Figure 3.3 présente l'évolution du retrait surfacique en fonction du cycle de dessiccation des Argiles Plastiques intactes. Le taux de retrait surfacique des trois échantillons est d'environ 5 % avec une légère augmentation en profondeur après le premier séchage. Après le deuxième séchage, 2 % de retrait est compté en plus pour ces échantillons sauf pour APM. Les trois échantillons ne présentent plus de retrait pendant le troisième séchage.



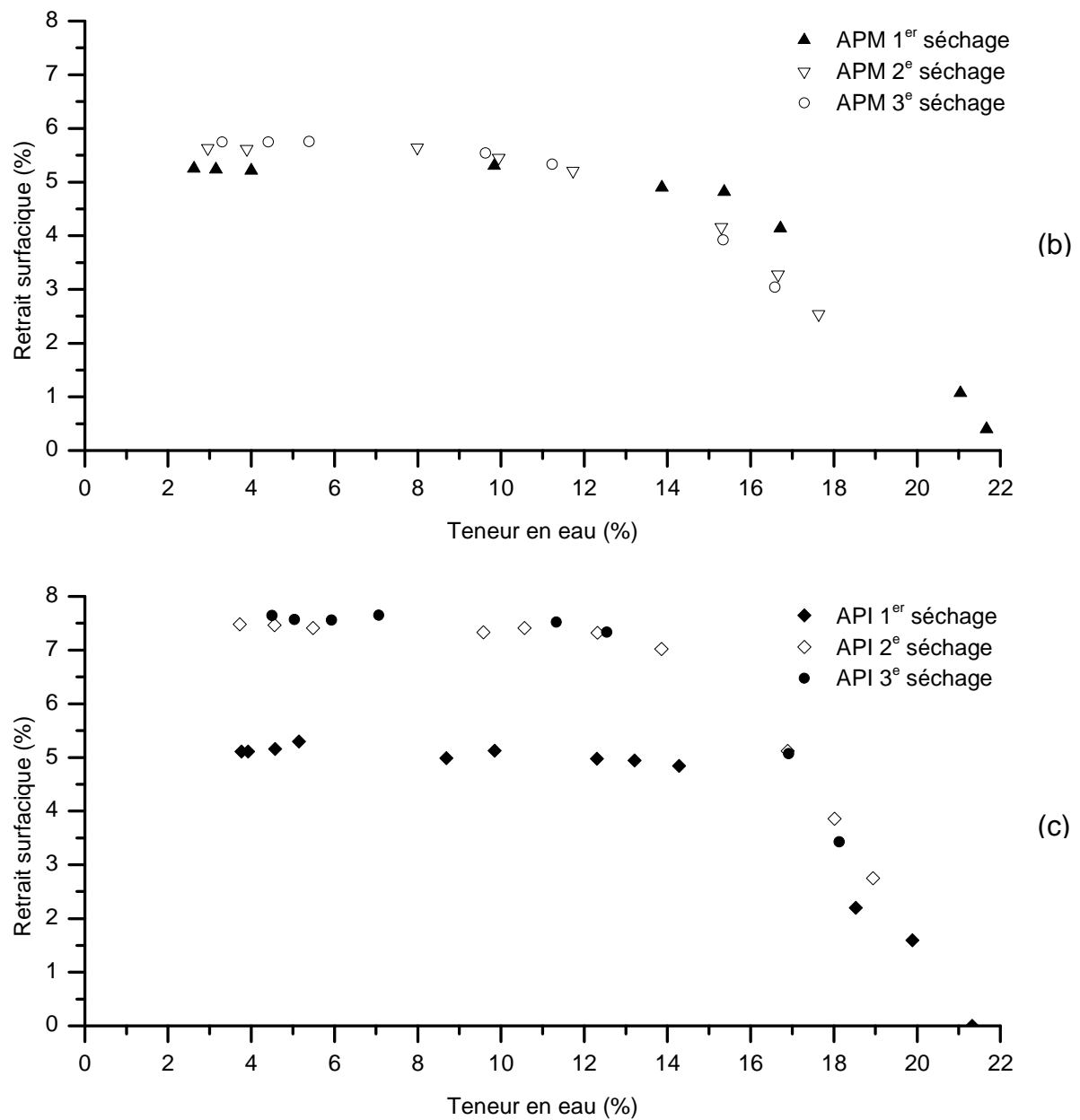


Figure 3.3 : Evolution du retrait surfacique en fonction du cycle de dessiccation (a : APS, b : APM, c : API)

Les trois échantillons intacts d'Argile Plastique APS, APM et API ont subi trois cycles de séchage complet-humectation jusqu'à la teneur en eau proche de la limite de retrait mais seul l'échantillon APM révèle l'existence de fissures (Figure 3.6).

Les photos obtenues sur les échantillons APS et API mettent en évidence l'absence de fissuration au cours des cycles séchage-imbibition, quelque soit la teneur en eau finale très basse, environ 1 à 4 %, (à la fin de chaque séchage) ou proche de la limite de retrait, environ 13 à 18 %, (à la fin de chaque humidification) (Figure 3.4 et Figure 3.5).



$w_o = 20,7 \%$



après 1^e séchage
($w = 1,3 \%$)



après 1^e humidification
($w = 13,9 \%$)



après 2^e séchage
($w = 1,4 \%$)



après 2^e humidification
($w = 12,6 \%$)



après 3^e séchage
($w = 1,7 \%$)

Figure 3.4 : Exemples de photos d'échantillon de APS au cours des cycles de dessiccation-humidification



$w_o = 21,3 \%$



après 1^e séchage
($w = 3,8 \%$)



après 1^e humidification
($w = 18,9 \%$)



après 2^e séchage
(w = 3,7 %)

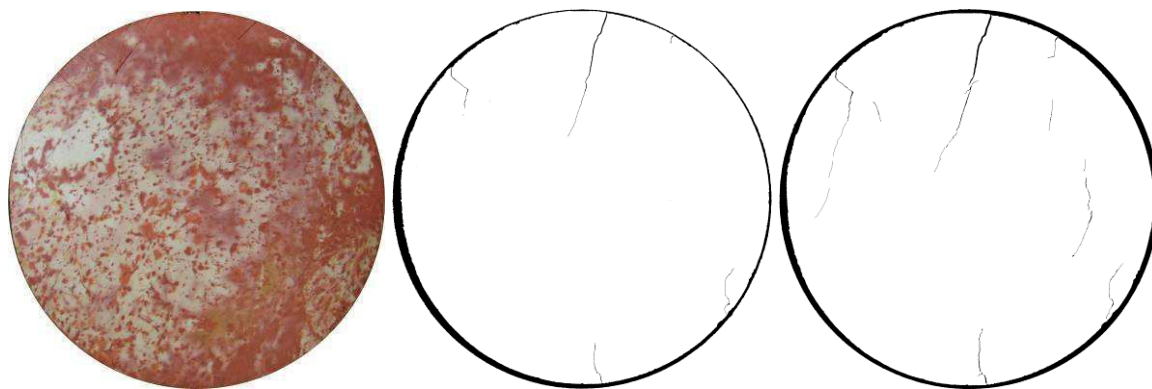
après 2^e humidification
(w = 18,1 %)

après 3^e séchage
(w = 4,5 %)

Figure 3.5 : Exemples de photos d'échantillon de API au cours des cycles de dessiccation-humidification

Pour l'échantillon APM, à l'état naturel initial, aucune fissure n'est décelable à l'observation. Dès le premier séchage, entre l'état naturel et la limite de retrait, le retrait provoque la création d'une porosité bidimensionnelle (microfissures). Cette porosité s'organise en quelques fissures fines, d'épaisseur inférieure à 1mm qui semblent suivre une direction. Le taux de fissuration augmente lorsque le séchage progresse, tant que la teneur en eau d'hydratation reste au-dessus de la limite de retrait. Il s'équilibre à 0,3 % après le premier séchage (Figure 3.7). Ce taux augmente à 0,4 % après le deuxième séchage qui montre qu'il y a un élargissement des anciennes fissures et l'apparition de nouvelles fissures pendant le deuxième cycle. Le taux de fissuration continue d'augmenter à 0,48 % après la deuxième humidification et il reste constant pendant le troisième séchage.

Il faut noter que pendant la préparation des Argiles Plastiques, on a observé d'anciennes surfaces de cisaillement ou « slickensides » qui témoignent de l'évolution microstructurale de l'argile durant les temps géologiques dans des blocs de APM. Ce type de surfaces n'a pas été décelé dans APS et API. Ces surfaces sont à l'origine des micro-fissures parallèles observées sur la surface de l'échantillon APM. Ces surfaces se sont en partie cicatrisées mais constituent des plans de faiblesse qui sont remobilisés lors de sollicitations hydriques successives.



$w_o = 22,3 \%$

$w = 16,7 \%$

après 1^e séchage
(w = 2,6 %)

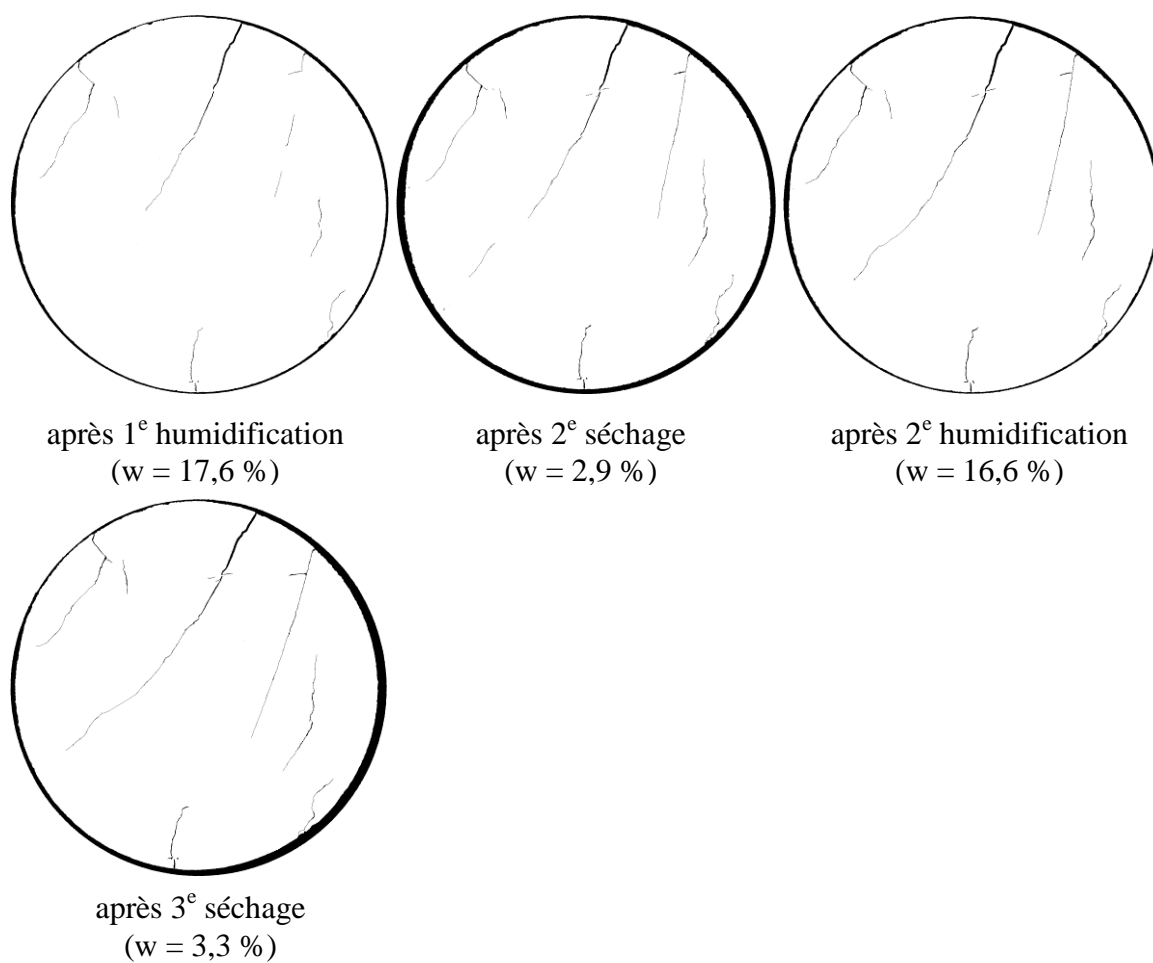


Figure 3.6 : Evolution des fissures à la surface d'échantillon de APM au cours des cycles de dessiccation-humidification

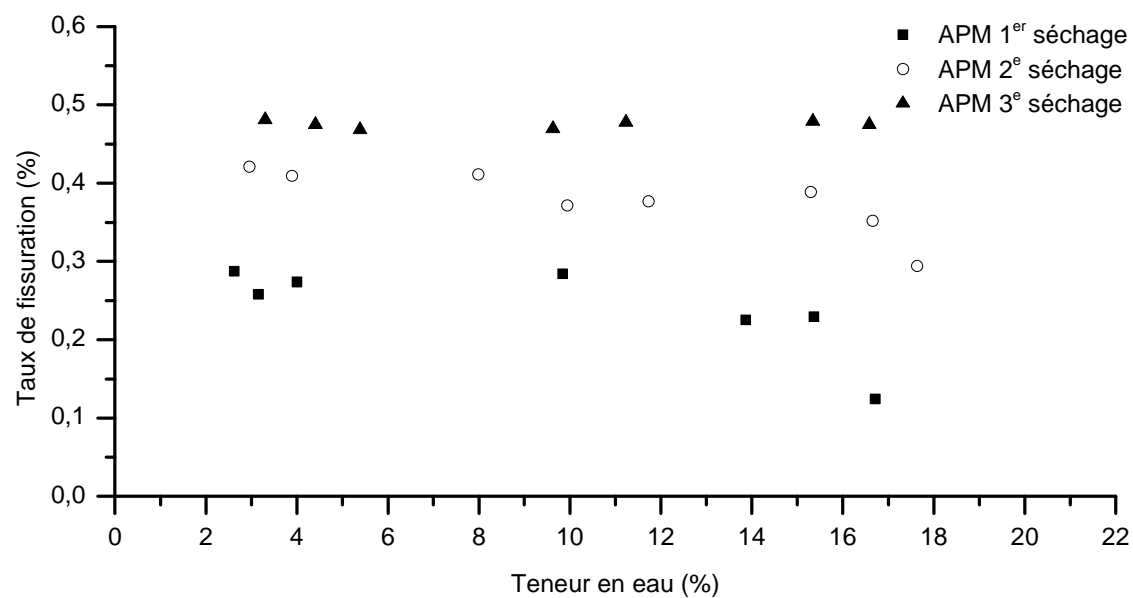


Figure 3.7 : Evolution du taux de fissures en fonction du cycle de dessiccation-humidification de l'échantillon de APM

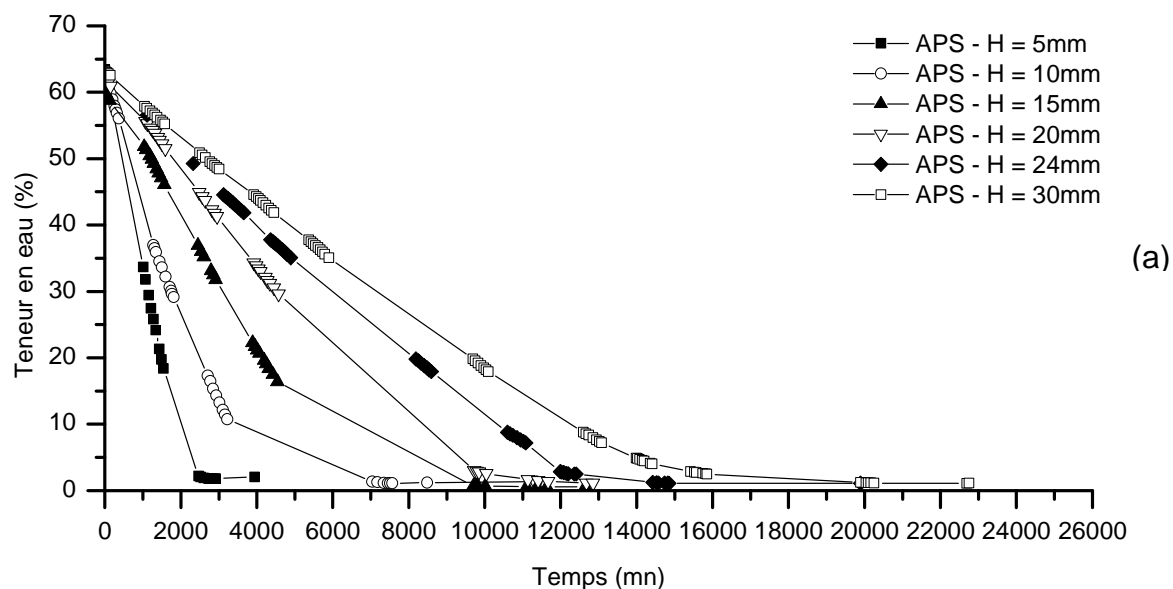
3.2. Retrait et fissuration des Argiles Plastiques remaniées au laboratoire

Le Tableau 3.2 précise les conditions initiales (dimensions ou épaisseurs des échantillons) ainsi que la nature de la surface de base (lisse ou rugueuse) pour les essais de dessiccation sur les échantillons APS, APM et API remaniés.

Tableau 3.2 : Observation de fissuration des éprouvettes de sols remaniés
(+ : fissuration observée, - : fissuration non observée)

Echantillons	Type de base	D=185 mm, Epaisseur (mm)					
		5	10	15	20	24	30
APS	lisse	-	-	-	-	-	-
	rugueuse					+	
APM	lisse	-	-	-	-	-	-
	rugueuse					+	
API	lisse	-	-	-	-	-	-
	rugueuse					+	

La Figure 3.8 montre les variations de teneur en eau en fonctions du temps (ou la cinétique de séchage) des échantillons d'Argiles Plastiques, de dimensions et teneurs en eau initiales différentes, soumis au séchage à l'air libre. Pour les trois échantillons, la teneur en eau diminue linéairement au cours du séchage au début, puis se stabilise. La taille des échantillons influence la cinétique de séchage : plus la taille de l'échantillon est importante, plus la pente de la courbe de perte d'eau diminue, et donc plus la durée de séchage augmente. A la fin du séchage, la teneur en eau finale est comprise entre 1 % et 2 % pour APS, 1,5 % et 3 % pour APM, 2,5 % et 4 % pour API.



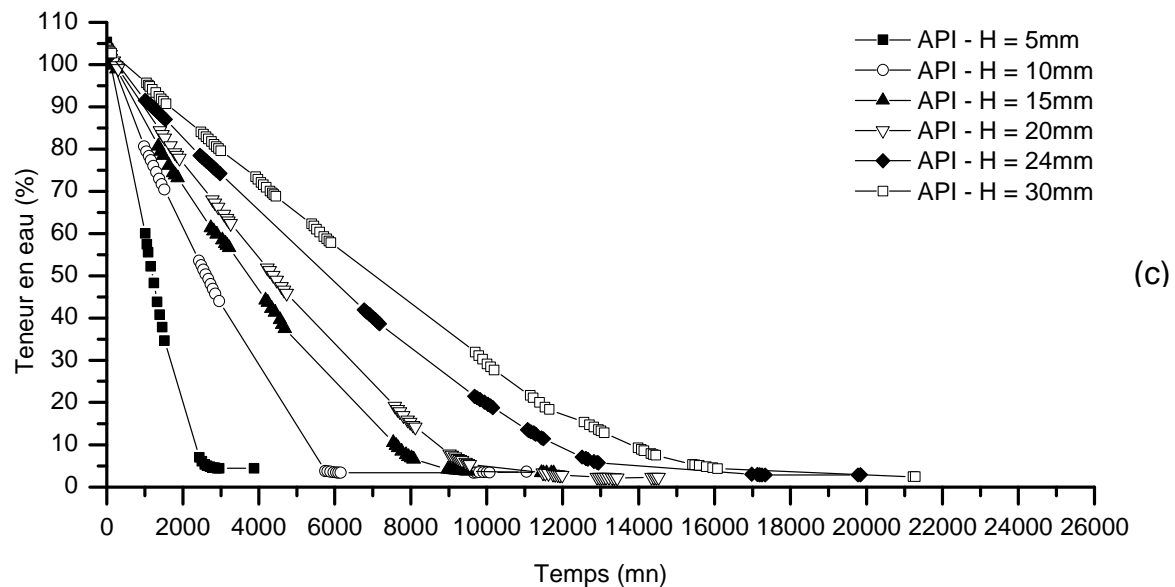
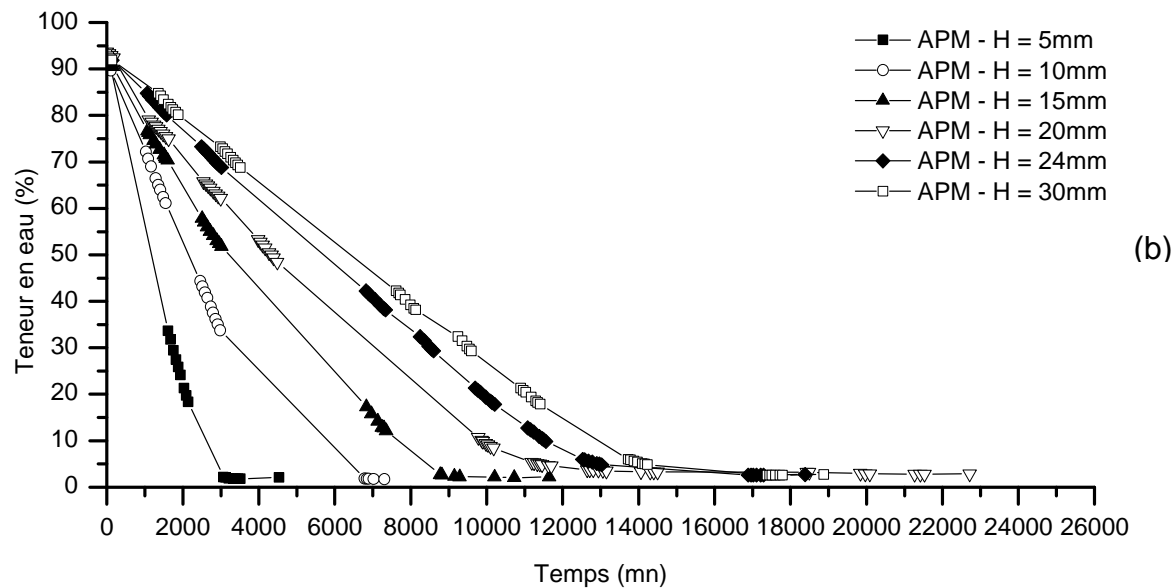


Figure 3.8 : Variation de teneur en eau en fonction du temps pour les Argiles Plastiques (a : APS, b : APM, c : API) soumises à la dessiccation.

D'après les observations, le séchage de la surface n'a pas été uniforme pour tous les échantillons. Durant un certain laps de temps, on distinguait des zones déjà sèches et des zones encore humides. En plus, dans tous les cas, le séchage surfacique a commencé sur les bords puis s'est propagé vers le centre. Ainsi, des gradients de teneur en eau se sont mis en place au sein de l'échantillon.

L'analyse du Tableau 3.1 met en évidence que tous les échantillons remaniés de APS, APM et API présentaient un retrait plastique sans fissuration. Le remaniement a détruit les surfaces de cisaillement préexistant dans APM intact, ce qui explique l'absence de fissuration dans les échantillons APM remaniés. Seuls les échantillons remaniés qui ont été mis en place sur la surface rugueuse présentent des signes de fissuration (Figure 3.9) mais ce phénomène de fissuration est localisé et ne s'étend pas à l'ensemble de l'éprouvette.



Figure 3.9 : Exemples de photos de séchage pour APM remanié D=185 mm, H=24 mm, base rugueuse

La comparaison des essais réalisés sur l'ensemble des échantillons remaniés met en évidence l'importance de la dimension (la hauteur) de matériau sur la cinétique de séchage mais aussi de la nature du support de base sur la fissuration du sol. Les particules argileuses qui sont en majorité dans ces matériaux facilitent le mouvement de rétraction (tangentielle à la surface de base au niveau de l'interface téflon/sol argileux) dans le cas du retrait libre. Lorsque la surface de base présente des aspérités, le frottement sur l'interface téflon/sol argileux est plus important, le retrait est contrarié à la base de l'échantillon et inhomogène dans le volume de l'échantillon, ce qui est à l'origine de la fissuration.

4. Comparaisons entre les sols étudiés et conclusions

Les résultats exposés dans ce chapitre montrent que les échantillons de différents niveaux d'Argile Plastique présentent le même comportement vis à vis de la fissuration au cours des cycles drainage-imbibition sauf l'échantillon APM à l'état intact.

Pour APM intact, ces cycles successifs révèlent d'anciennes surfaces de cisaillement ou « slickensides » qui s'ouvrent à nouveau sous l'effet des sollicitations hydriques. Pour APS et API intact, ils ne présentent aucune fissuration au cours des cycles successifs quelle que soit la teneur en eau, très basse (1 à 4 %) ou proche de la limite de retrait (13 à 18 %). Les trois sols remaniés ne présentent pas de fissuration pour les éprouvettes placées sur une surface lisse. Cette absence de fissuration peut-être attribuée au frottement très faible de l'interface téflon/sol argileux et à la destruction des « slickensides » par le remaniement dans le cas de APM.

En outre, le phénomène de fissuration observé sur les matériaux remaniés est fonction de la nature de l'interface matériau-support. La nature de la surface de contact joue donc un rôle primordial dans la fissuration des matériaux remaniés qui est en accord avec les observations sur les sols remaniés de Péron et Laloui (2005). D'après Colina (1992) et Dyer et Coulson (2003), les dimensions (diamètre et épaisseur) des échantillons ont une influence considérable sur l'initiation et la géométrie des fissures. Cependant, dans cette étude, les fissures ne sont pas observées à partir des échantillons remaniés de trois sols en préparant des éprouvettes de 185 mm de diamètre et en variant la hauteur de 5 mm à 30 mm.

Dans le cas des Argiles Vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil, des surfaces de micro-cisaillement ou « slickensides » favorisent aussi l'ouverture de fissures

dans les Argiles Vertes de Romainville intactes, alors qu'un squelette semi-rigide formé par les carbonates contrarie la fissuration dans le cas des Marnes bleues d'Argenteuil intactes. Pour l'Argile verte de Romainville remaniée, aucune fissuration n'a été observée et cette absence de fissuration peut-être attribuée au faible frottement de l'interface téflon/argile à la base des éprouvettes. Lorsque les Marnes bleues d'Argenteuil sont remaniées, ce squelette est détruit, les grains de carbonates jouent alors un rôle de points durs, en créant des forces de frottement au contact du support qui s'opposent localement aux forces de rétraction et favorisent ainsi la fissuration. Cette fissuration est observée sur les échantillons séchés sur une surface lisse ou rugueuse. La nature de la surface de contact et le volume des échantillons jouent aussi un rôle primordial dans la fissuration des matériaux remaniés (Yigzaw 2009).

Chapitre 4 - *Phénomènes de vieillissement rhéologique du sol soumis à des cycles hydriques accélérés*

1. Introduction

Dans le chapitre 2, le gonflement libre des Argiles Plastiques (à l'état intact et l'état remanié) et de l'argile d'Héricourt (à l'état intact, remanié et compacté), soumises à une simple phase d'humidification, a été étudié. Les changements microstructuraux ont également été suivis au cours du gonflement simple. Cependant dans la nature, les sols argileux ne sont pas soumis qu'à une simple phase d'humidification mais à des cycles répétés d'imbibition-séchage pour lesquels l'état initial et l'état final changent d'un cycle à l'autre. De nombreuses études sont disponibles au laboratoire en réalisant des essais de retrait-gonflement cycliques sur les sols gonflants, qui sont principalement remaniés et compactés, pour analyser l'effet de sollicitations hydriques cycliques ou simuler des déformations engendrées par des variations saisonnières de teneur en eau (Popescu 1980 ; Subba Rao et Satyadas 1987 ; Day 1994 ; Al-Homoud et al. 1995 ; Tripathy et al. 2002). Ces travaux ont montré qu'après trois à cinq cycles de retrait-gonflement, les sols atteignent un état d'équilibre où les déformations verticales pendant le gonflement et le retrait sont les mêmes. In-situ, un changement de volume réversible entre les limites fixes a été aussi observé pour des horizons de surface des sols agricoles qui ont subi de nombreux cycles de séchage et de remouillage (Yong et Warkentin 1975). Cependant, Songyu et al. (1998) ont observé que la hauteur des échantillons de sols gonflants compactés augmente avec les cycles d'humidification-séchage, et que le phénomène de retrait-gonflement cyclique n'est pas complètement réversible. Pour la réversibilité de ce phénomène, selon Haines (1923), si le séchage du sol ne s'étend pas au-dessous de la limite de retrait, le remouillage et le séchage suivants ont lieu de manière réversible. Yong et Warkentin (1975) ont trouvé que les sols argileux contenant de la Montmorillonite montrent un gonflement et un retrait presque réversibles en cours de remouillage et de séchage. Récemment, dans leur étude sur le retrait-gonflement cyclique des sols naturels, Yigzaw et al. (2009) ont montré que les échantillons de sols naturels atteignent la stabilisation des déformations verticales après le troisième cycle mais présentent en même temps une augmentation progressive du volume due à l'accumulation des gonflements résiduels après les cycles. Bien que les essais de retrait-gonflement cycliques ci-dessus sont faits dans des conditions différentes, il apparaît différentes conclusions. Ces essais ont montré que le potentiel de gonflement peut réduire ou augmenter par rapport au premier cycle de gonflement. Par conséquent, l'évaluation du comportement des sols gonflants, sans tenir compte des fluctuations saisonnières cycliques, peut sous-estimer le potentiel de gonflement du sol (Tripathy et al. 2002).

Dans ce chapitre, l'effet de cycles d'humectation-séchage sur le comportement des Argiles Plastiques et de l'argile d'Héricourt est ainsi étudié, en considérant plus particulièrement le changement de la microstructure au cours de ces cycles de retrait-gonflement. Des échantillons de APM intact, parmi les trois niveaux d'Argiles Plastiques, sont choisis pour analyser le gonflement libre sous sollicitations hydriques cycliques. En plus, le comportement de l'argile d'Héricourt, compactée non-traitée et traitée à la chaux, soumise à des cycles de séchage-imbibition, est aussi étudié dans ce chapitre. Les protocoles d'essais de gonflement libre mis en œuvre au laboratoire sont d'abord présentés. Ensuite, les résultats obtenus au cours des essais de gonflement cyclique menés sur les échantillons de APM et les échantillons de AH non-traité et traité à la chaux sont analysés. Le changement microstructural au cours du

gonflement cyclique est présenté. Enfin, une comparaison entre les comportements de gonflement cyclique des Argiles Plastiques, des Argiles Vertes de Romainville et des Marnes Bleues d'Argenteuil est réalisée.

2. Protocoles d'essai

Les essais de gonflement cyclique sont réalisés dans des moules cylindriques, de type oedométrique, en plexiglas, selon la procédure ASTM, D 4546-96 méthode A (Yigzaw 2009).

Pour l'Argile Plastique, cinq échantillons de APM (E1, E2, E3, E4 et E0) sont taillés à partir d'un même bloc ($D = 70$ mm et $H = 20$ mm) et mis en place en même temps suivant la procédure de l'essai de gonflement libre décrite au chapitre 2. Ces échantillons sont soumis alternativement à des phases d'humectation et des phases de séchage jusqu'à la stabilisation de la déformation verticale qui est suivie en cours de gonflement et de dessiccation. Le premier cycle commence par une phase d'imbibition à partir de la teneur en eau initiale. Après stabilisation du gonflement pour chaque cycle, les échantillons sont mis au séchage dans une étuve à température contrôlée (45°C). Le processus de séchage des échantillons, sous les conditions de cet essai, est très lent et prend cinq à six semaines. Pour étudier le changement microstructural au cours des cycles de gonflement, E0 est sorti du moule oedométrique à la fin de la première phase de gonflement, soumis à un essai porosimétrique et observé au MEB. Similairement, E1 est retiré à la fin de la deuxième phase de gonflement, E2 à la fin de la quatrième phase de gonflement. E3 et E4 sont soumis à des cycles supplémentaires jusqu'à la sixième et huitième phase de gonflement. Les paramètres géotechniques de ces échantillons de APM (la teneur en eau initiale, la masse volumique sèche initiale et la pression verticale appliquée) sont donnés dans le Tableau 4.1. Suivant ce tableau, on remarque que les conditions initiales des échantillons de APM (avec une teneur en eau d'environ 22 % et une masse volumique sèche d'environ $1,67 \text{ Mg/cm}^3$) sont quasi identiques.

Tableau 4.1 : Paramètres géotechniques des échantillons de APM soumis à des essais cycliques

Paramètres	E0	E1	E2	E3	E4
Teneur en eau initiale, $w(\%)$	21,80	22,49	22,64	22,47	22,20
Masse volumique sèche initiale, $\rho_d (\text{Mg/cm}^3)$	1,69	1,67	1,66	1,67	1,68
Pression verticale due au piston (kPa)	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7

Pour l'argile d'Héricourt compactée, quatre échantillons dont deux non-traités et deux traités à la chaux (5 % de CaO) sont préparés en les compactant directement dans les moules oedométriques et mis en place suivant les procédures décrites aux chapitres 1 et 2. Les quatre échantillons sont compactés à une masse volumique sèche $\rho_d = 1,4 \text{ Mg/cm}^3$ et une teneur en eau $w = 9$ %, la pression verticale appliquée au cours des gonflements est d'environ 0,7 kPa. Afin d'analyser la microstructure au cours des essais cycliques, deux échantillons, dont un non-traité et un traité à la chaux, sont arrêtés à la fin de la première phase de gonflement. Les deux autres sont arrêtés à la fin de la quatrième phase de gonflement.

Il faut noter que le gonflement ou le retrait présentés dans cette étude sont calculés par le ratio de déformation axiale $\Delta H/H_i$ où H_i est l'épaisseur de l'éprouvette à la fin du gonflement ou du retrait précédent.

3. Résultats

3.1 Gonflement libre de l'Argile Plastique (APM) en fonction des cycles hydriques

La Figure 4.1 présente les cinétiques de gonflement des échantillons E1, E2, E3 et E4 au cours des cycles d'humectation-dessiccation. On remarque que la cinétique de gonflement lors du premier cycle est plus lente que les suivantes pour les quatre échantillons. A partir du deuxième cycle, le gonflement est sensiblement plus rapide. Ceci résulte de la faible perméabilité du matériau à l'état initial, les cycles d'imbibition-séchage ayant pour effet d'augmenter la conductivité hydraulique du sol intact. Ce phénomène peut être expliqué par l'existence de chemins préférentiels après le premier séchage. En effet, l'ouverture de fissures de retrait au cours du séchage, observées en fin de séchage, entraîne la création de chemins préférentiels empruntés par l'eau lors du processus de réhumidification suivant.

Lors du premier cycle, le taux de gonflement est contrôlé par les conditions initiales. Les quatre échantillons de APM, présentant des teneurs en eau et des masses volumiques sèches initiales quasi identiques, montrent des taux de gonflement voisins, variant de 10 % à 13 %. Le gonflement maximal se produit au deuxième cycle. A partir du troisième cycle, le taux de gonflement des échantillons E2, E3 et E4 semble se stabiliser (taux de gonflement compris entre 10 et 12 %).

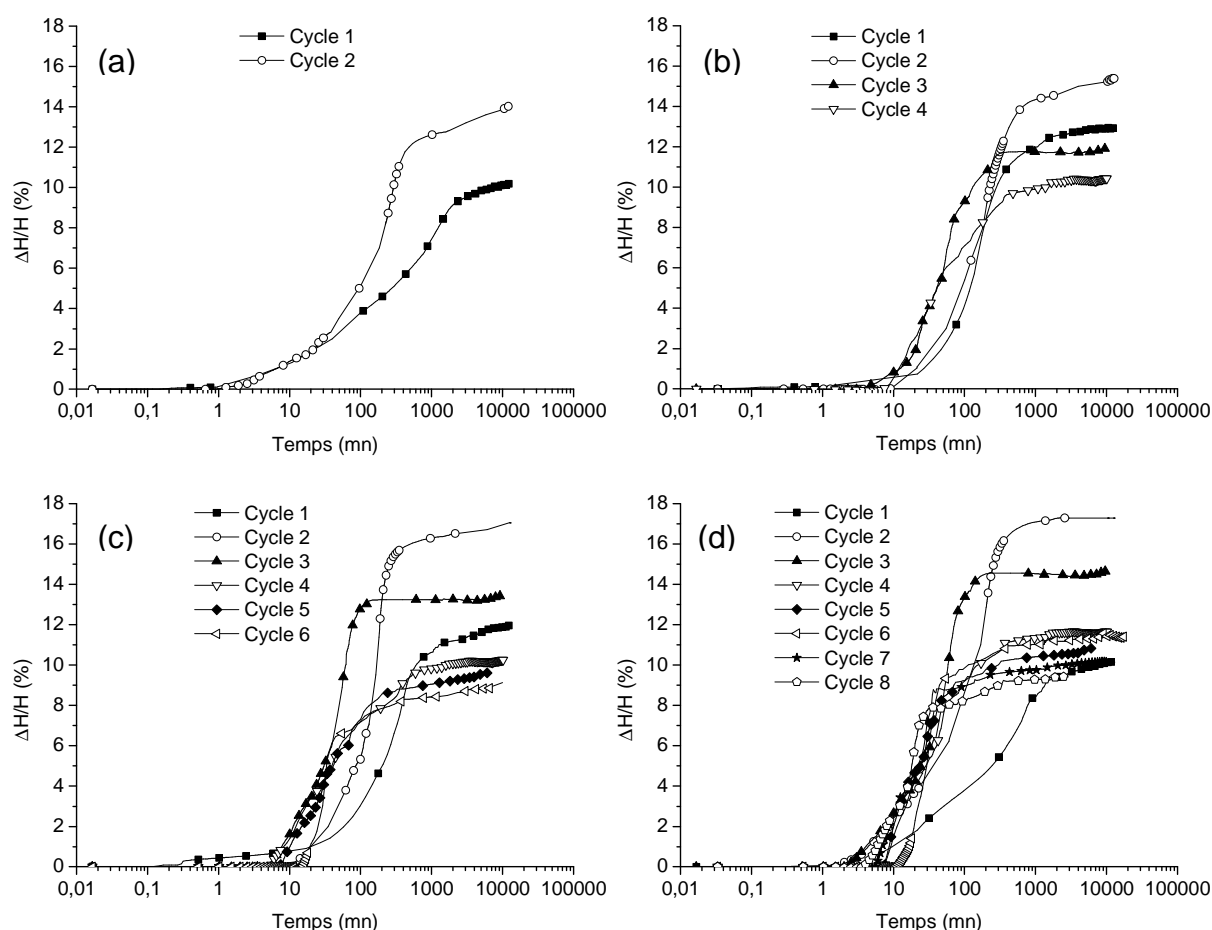


Figure 4.1 : Cinétique de gonflement des échantillons de APM soumis alternativement à des phases d'imbibition-séchage : a) E1, b) E2, c) E3, d) E4

La Figure 4.2a représente les taux de gonflement et de retrait des échantillons de APM au cours de différents cycles de sollicitations hydriques. On trouve que l'amplitude de gonflement est plus grande que l'amplitude de retrait pour tous les échantillons et pour chaque cycle. Ainsi, la hauteur des échantillons ne revient pas à la valeur d'origine dès le premier cycle (Figure 4.2b) et ce phénomène augmente au cours des cycles. Par exemple, après cinq cycles de gonflement-retrait, l'épaisseur des échantillons E3 et E4 est d'environ 30 % plus grande que l'épaisseur de départ alors que la déformation mesurée pour chaque cycle reste approximativement constante dès le 3^e cycle (Figure 4.3a). Le retrait des échantillons E3, E4 est aussi stabilisé dès le 3^e cycle (Figure 4.3b). Les cycles de gonflement-retrait successifs entraînent une augmentation progressive du volume qui se traduit par une augmentation de la capacité d'absorption d'eau : la teneur en eau moyenne de départ des échantillons de 22 % passe à 25 % à la fin du 1^{er} gonflement, puis à 35 %, 36 % et atteint 41 % à la fin du sixième gonflement. La déformation engendrée par les cycles de retrait-gonflement n'est donc pas complètement réversible pour les échantillons de APM intact. Les courbes présentées montrent néanmoins que l'on se dirige vers une stabilisation de ce phénomène (après environ 6 cycles).

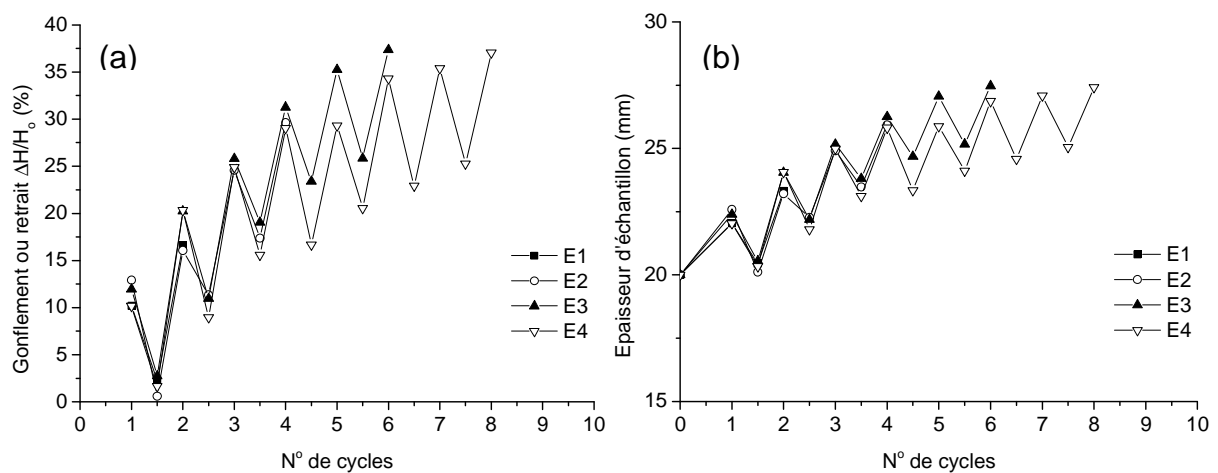


Figure 4.2 : Taux de gonflement et de retrait des échantillons de APM soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement/retrait ; b) Epaisseur des échantillons.

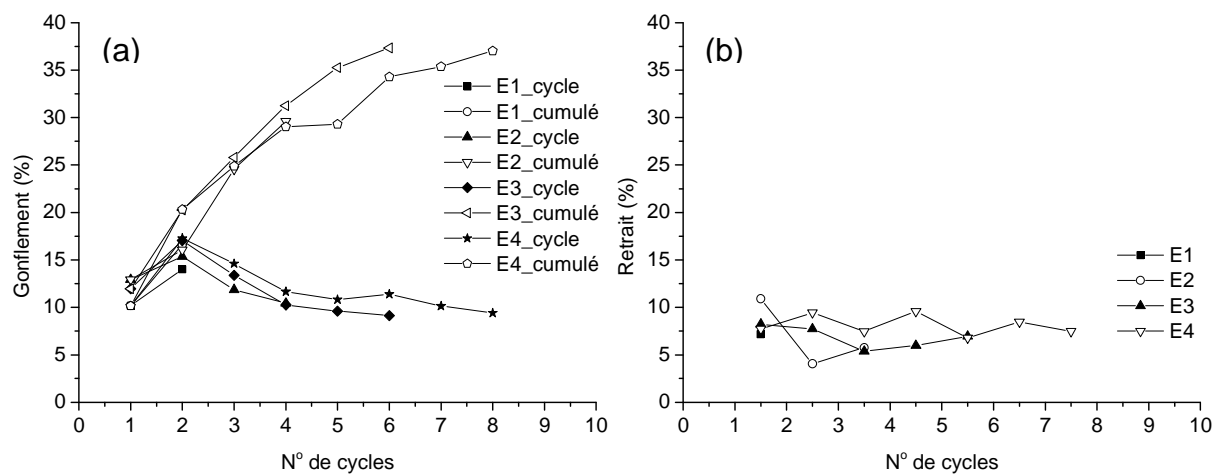


Figure 4.3 : Taux de gonflement et de retrait des échantillons de APM soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement cumulé et pour chaque cycle ; b) Taux de retrait pour chaque cycle

3.2 Gonflement libre de l'argile d'Héricourt compactée en fonction de cycles hydriques

La Figure 4.4 présente les cinétiques de gonflement de deux échantillons d'argile d'Héricourt compactée dont un non-traité et un traité à la chaux. Dans le premier cycle, le taux de gonflement est contrôlé par les conditions initiales pour le sol non-traité et par l'effet d'hydratation pour le sol traité à la chaux. Pour l'échantillon non-traité, le taux de gonflement du premier cycle est d'environ 23 % et la cinétique de gonflement lors du premier cycle est plus lente que pour les cycles suivants. A partir du deuxième cycle, le gonflement est sensiblement plus rapide, ce qui montre que la perméabilité du sol compacté augmente aussi sous l'effet des cycles de gonflement-séchage. A partir du troisième cycle, le taux de gonflement de l'échantillon non-traité semble se stabiliser à 15 %. Ce phénomène est similaire à celui des échantillons de APM intacts.

Pour l'échantillon traité à la chaux, le taux de gonflement est d'environ 25 %, ce qui est un peu plus élevé que celui de l'échantillon non-traité. Le phénomène de gonflement de l'échantillon traité à la chaux a lieu. Il se stabilise immédiatement après l'immersion dans l'eau, ce qui peut être expliqué par l'effet de l'expansion de chaux vive se transformant en chaux éteinte suivant une réaction exothermique au cours de l'hydratation, comme observé au chapitre 1. On trouve que l'ajout de chaux a pour effet de supprimer le potentiel de gonflement du sol traité à la chaux à partir du deuxième cycle.

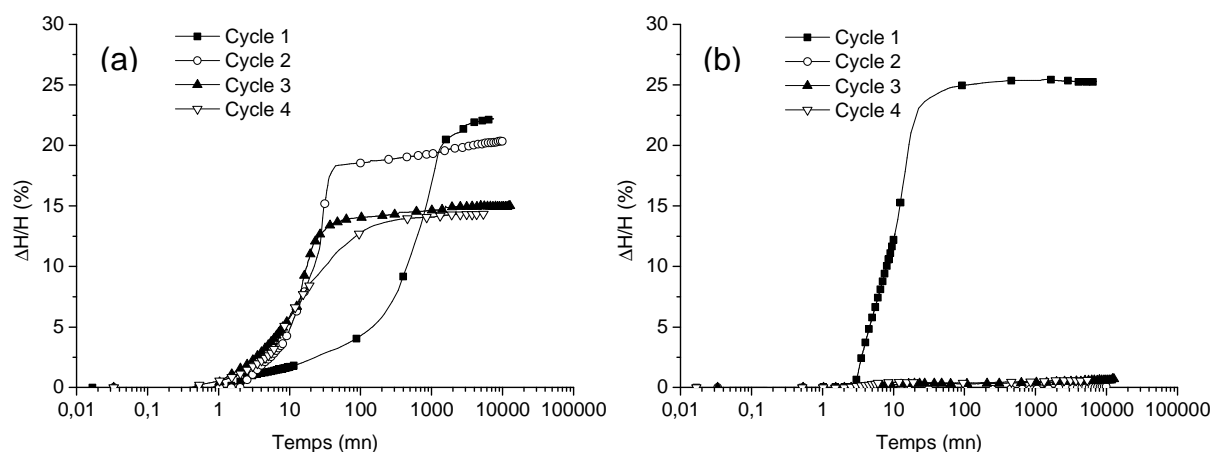


Figure 4.4 : Cinétique de gonflement des échantillons de AH compactée, soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Echantillon non-traité ; b) Echantillon traité à la chaux

La Figure 4.5 représente les taux de gonflement et de retrait de deux échantillons, non-traité et traité à la chaux, au cours des différents cycles de sollicitations hydriques. Pour l'échantillon non-traité, l'amplitude de gonflement est plus grande que l'amplitude de retrait pour les 2 premiers cycles (Figure 4.5a). Dès le premier cycle, la hauteur de cet échantillon ne revient pas à la valeur d'origine (Figure 4.5b) et ce phénomène augmente au cours des cycles comme observé dans le cas des échantillons de APM. L'épaisseur de l'échantillon non-traité est de 43 % plus grande que son épaisseur de départ, après quatre cycles de gonflement-retrait, alors que la déformation mesurée pour chaque cycle reste approximativement constante dès le 3^e cycle (Figure 4.6a). Les cycles de gonflement-séchage successifs entraînent une augmentation progressive du volume de sol. La déformation du sol compacté, engendrée par les cycles de retrait-gonflement, n'est donc pas complètement réversible. Cependant, les courbes présentées de sol non-traité semblent se stabiliser après trois cycles de retrait-gonflement où le gonflement et le retrait sont égaux. Pour l'échantillon traité à la chaux, le taux de gonflement

et l'épaisseur de l'échantillon reste constants après le traitement au cours du premier cycle (Figure 4.5a, b).

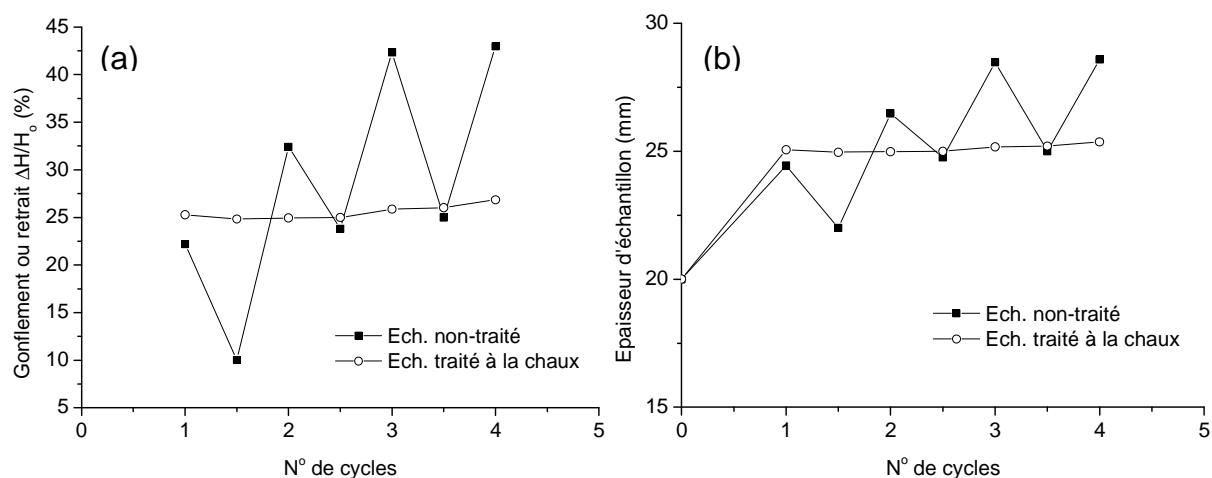


Figure 4.5 : Taux de gonflement et de retrait des échantillons de AH compactée, soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement/retrait ; b) Epaisseur des échantillons.

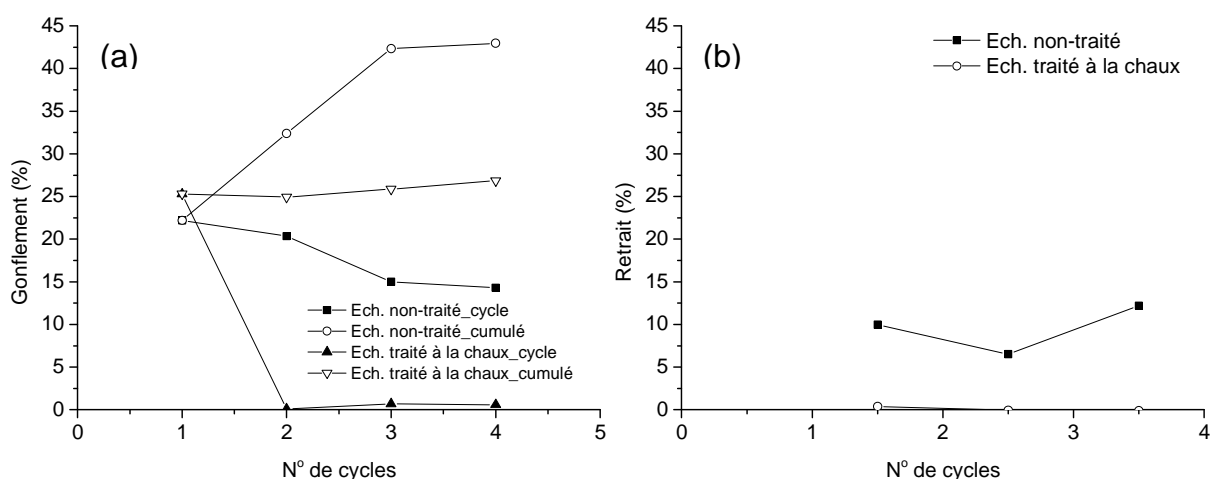


Figure 4.6 : Taux de gonflement et retrait des échantillons de AH compactée, soumis alternativement à des phases d'imbibition/séchage : a) Taux de gonflement cumulé et pour chaque cycle ; b) Taux de retrait pour chaque cycle

3.3 Aspects microstructuraux du gonflement libre en fonction des cycles hydriques

3.3.1. Argile Plastique

Pour étudier l'effet des sollicitations hydriques cycliques sur la microstructure, des échantillons d'Argile Plastique (APM) soumis à un nombre de cycles de gonflement-retrait croissants (1, 2, 4, 6, et 8 cycles) sont analysés au porosimètre au mercure et au MEB. Ces résultats sont ensuite comparés avec ceux obtenus sur les échantillons intacts correspondants.

Les résultats des essais porosimétriques sur les échantillons de APM, après différents cycles de gonflement-retrait, sont présentés sur la Figure 4.7. La Figure 4.7a présente les courbes de volume poreux cumulé de l'échantillon de APM à l'état initial et après 1, 2, 4, 6 et 8 cycles.

Ces courbes montrent que le volume poreux accessible par la porosimétrie au mercure augmente au cours des cycles de gonflement (de 25 % après 1 cycle à 120 % après 8 cycles).

La Figure 4.7b présente les courbes de distribution des rayons d'accès de pores des échantillons de APM après différents cycles. On trouve que la famille de pores inter-agrégats qui n'existe pas à l'état intact mais apparaît après le 1^{er} gonflement (rayons : 0,15 μm), évolue au cours des cycles successifs. Son rayon modal se déplace d'abord vers les rayons d'accès croissants jusqu'au quatrième cycle, diminue ensuite légèrement et se stabilise pour les 2 derniers cycles (6^e et 8^e cycle). Ainsi le rayon modal de cette famille de pores inter-agrégats d'APM se déplace progressivement de 0,15 μm (après 1 cycle) à 0,25 μm (après 2 cycles), atteint 0,55 μm (après 4 cycles) et revient à 0,40 μm (après 6 et 8 cycles). Il faut noter qu'au-delà du quatrième cycle, le gonflement favorise une homogénéisation du milieu poreux plus que l'accroissement du rayon moyen d'accès de pores (Yigzaw 2009). En outre, le changement en dimension modale de la famille de pores intra-agrégat n'est pas observé au cours des cycles, ce qui montre que cette famille de pores n'est pas affectée par les cycles de sollicitations hydriques.

A l'état intact, l'échantillon de APM ne présente qu'une seule famille de pores vers les très faibles rayons, de 0,025 μm environ. Cette famille de pores intra-agrégat n'est pas ou peu affectée par le gonflement. Le gonflement libre dû aux humidifications cycliques se traduit donc principalement par une création et une augmentation de la porosité accessible par des pores inter-agrégats. Ceci montre que le gonflement libre dû aux humidifications cycliques se traduit plus particulièrement par une augmentation de porosité inter-agrégats qui correspond à l'écartement des agrégats et à l'ouverture de pores existants. Autrement dit, au cours des cycles d'hydratation, la microstructure du sol APM évolue, la porosité augmente en taille et en volume par ouverture progressive de la porosité inter-agrégats.

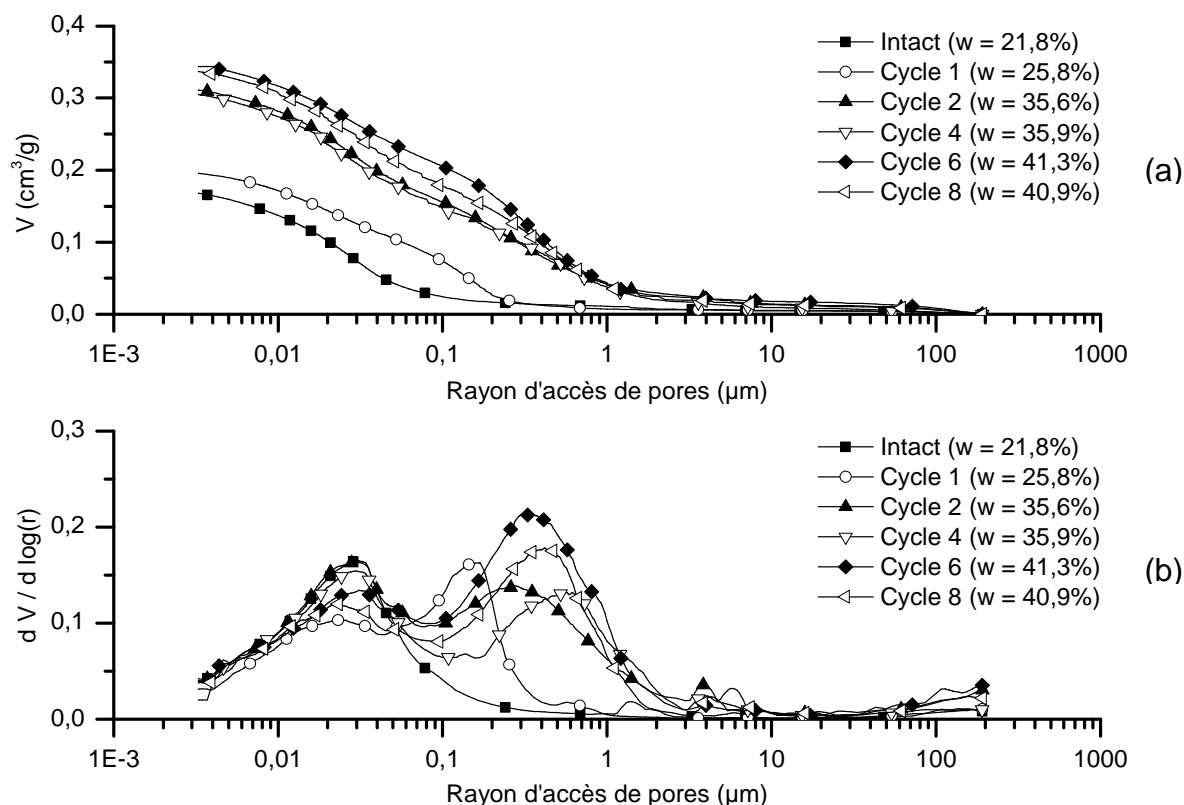
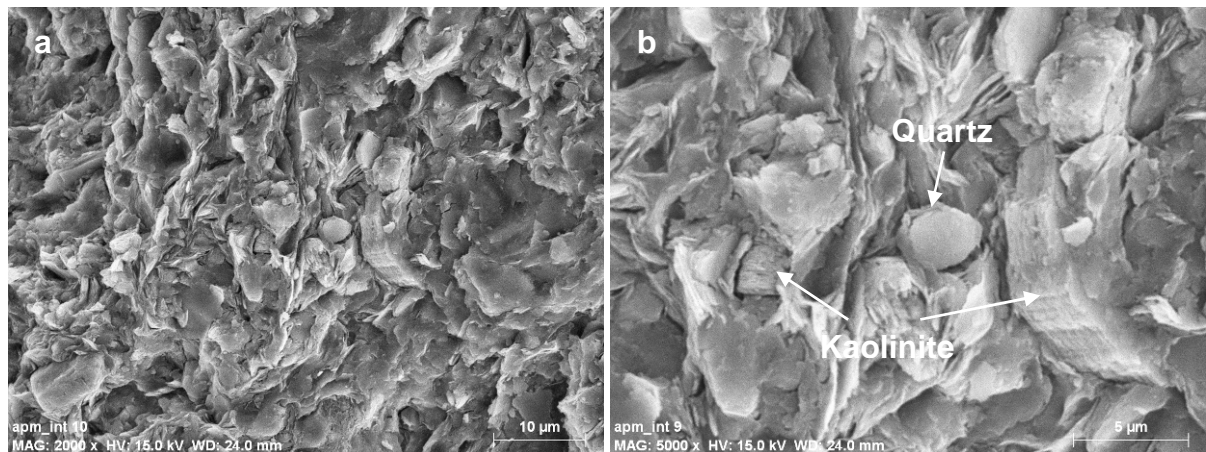


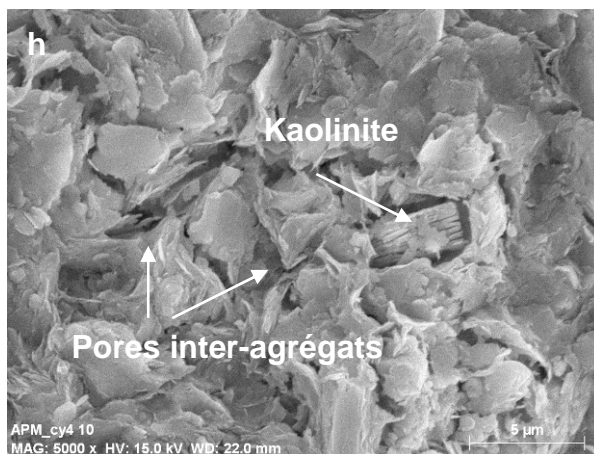
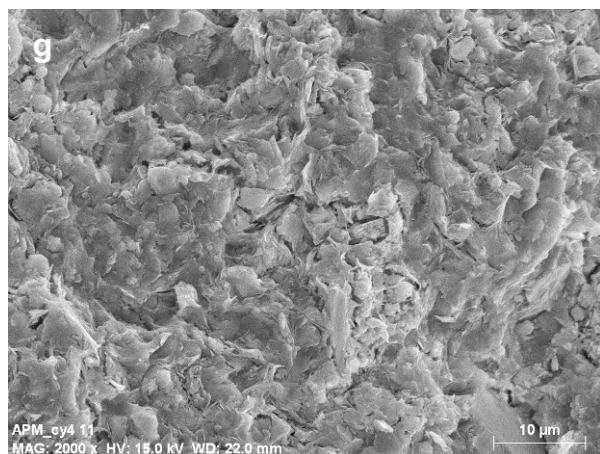
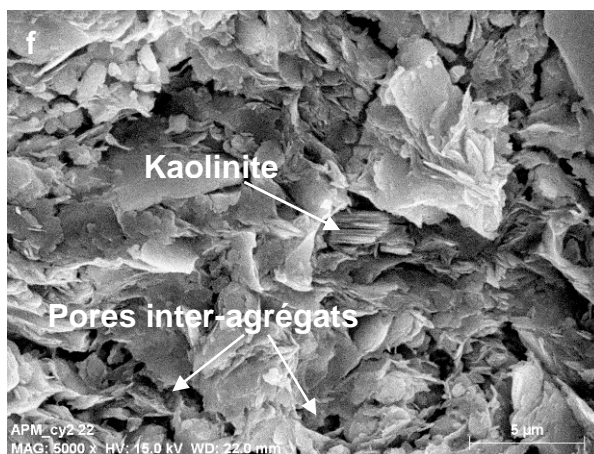
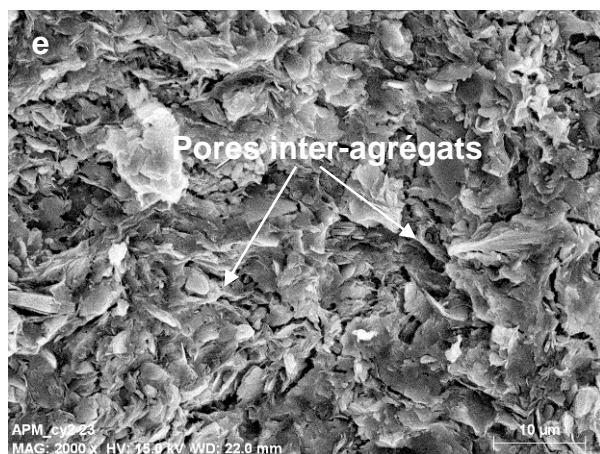
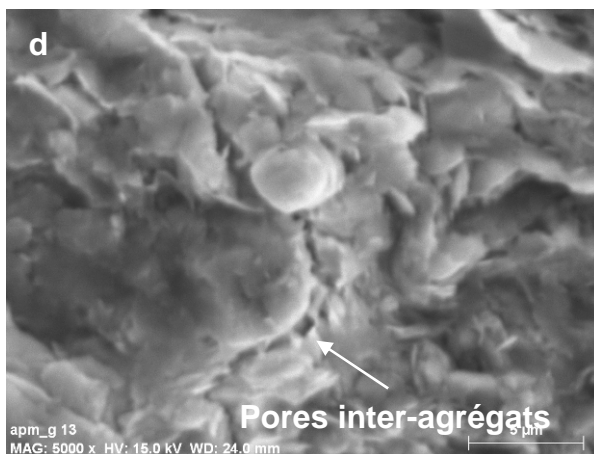
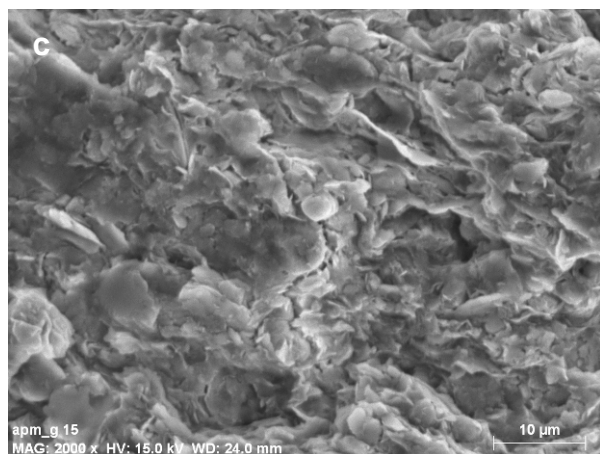
Figure 4.7 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile Plastique (APM) pour les cycles 1, 2, 4, 6 et 8.

La microstructure de l'échantillon intact et après un cycle de gonflement est décrite dans les chapitres précédents. A l'état intact, l'échantillon de APM est caractérisé par une microstructure relativement compacte où les agrégats ne sont pas bien individualisés. Elle est formée d'une matrice argileuse dans laquelle sont noyés des grains de quartz dispersés (Figure 4.8a, b). Après un cycle de gonflement, l'observation au MEB met en évidence l'apparition des pores inter-agrégats (porosité bidimensionnelle) qui initient dans la matrice argileuse la formation d'agrégats primaires (Figure 4.8c, d). La matrice argileuse de l'échantillon, après un cycle de gonflement, est encore relativement dense.

L'observation réalisée au MEB pour l'échantillon, après 2 cycles de gonflement (Figure 4.8e, f), montre une microstructure totalement différente et plus aérée qu'après le premier cycle de gonflement. On observe un réseau de pores inter-agrégats plus dense avec une plus grande ouverture des pores. Ces pores délimitent des agrégats argileux plus petits (quelques microns). A l'issue de ce 2^{ème} cycle, on observe que le type de microstructure du sol n'est pas fondamentalement modifié.

Il faut noter qu'après le quatrième cycle de gonflement, les échantillons ont perdu une grande partie de leur cohésion ce qui entraîne des difficultés pour obtenir des échantillons intacts pour les observations au MEB. Lorsqu'on retire l'échantillon du moule, une partie se désagrège et devient une boue. Ainsi, la portion de l'échantillon prélevée est celle qui présente la cohésion la plus grande. Les observations sont donc faites sur les parties les moins déstructurées. Ces observations sont donc biaisées. Les images présentées sur la Figure 4.8 montrent la microstructure d'échantillons de APM après 4 (Figure 4.8g, h), 6 (Figure 4.8i, j) et 8 (Figure 4.8k, l) cycles de gonflement. On observe une microstructure très lâche constituée d'amas argileux et de cristallites individualisés, avec des pores de forme et d'ouverture différentes.





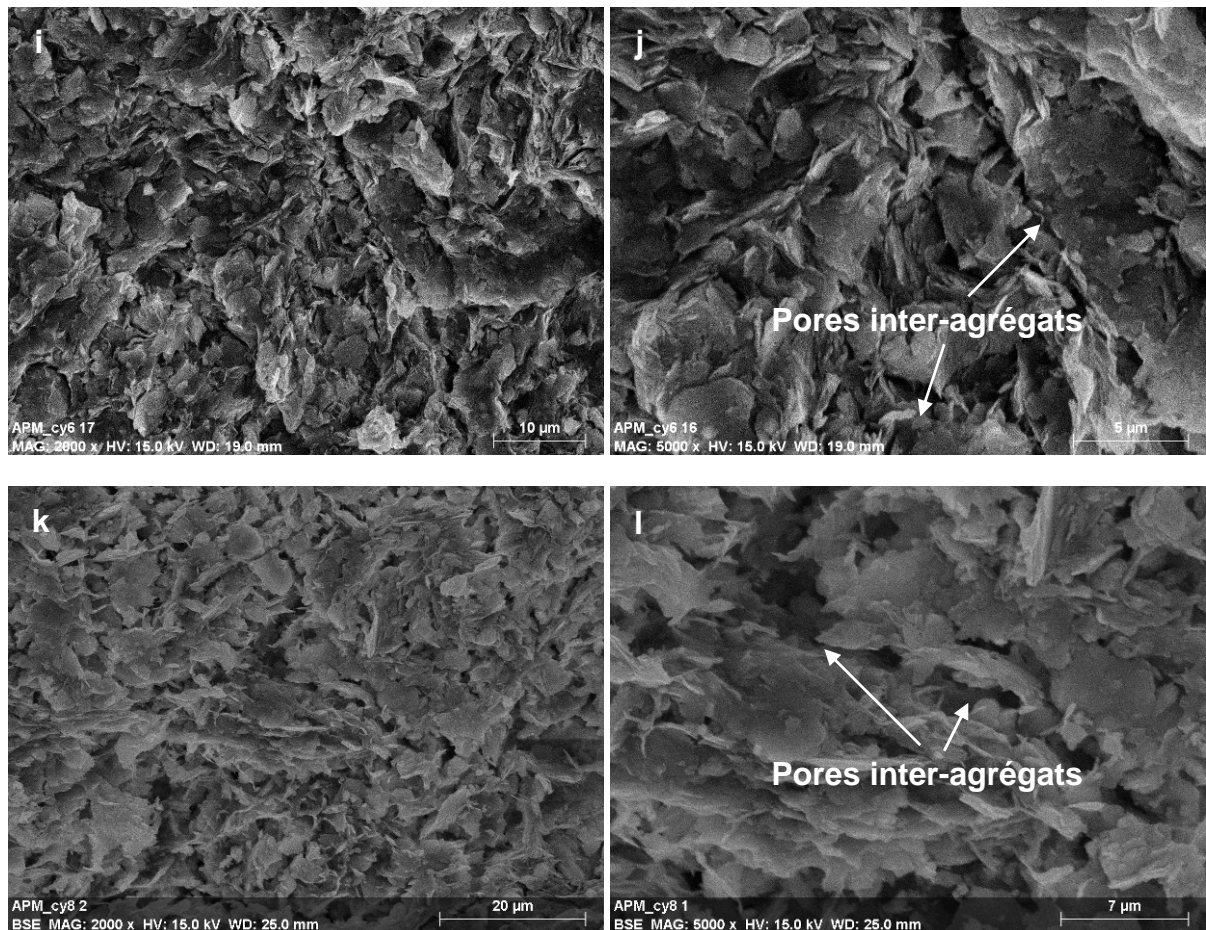


Figure 4.8 : Photos au MEB des échantillons de APM : a, b) état initial ; c, d) après 1 cycle de gonflement ; e, f) après 2 cycle de gonflement ; g, h) après 4 cycles de gonflement ; i, j) après 6 cycle de gonflement ; k, l) après 8 cycles de gonflement

3.3.2. Argile d'Héricourt compactée

Dans cette partie, l'effet des sollicitations hydriques cycliques sur la microstructure des échantillons d'argile d'Héricourt non-traitée et traitée à la chaux soumis aux cycles de gonflement-retrait croissants (1 et 4 cycles) est analysé au porosimètre au mercure et au MEB.

Les résultats des essais porosimétriques sur les échantillons de AH non-traité, après 1 cycle et 4 cycles de gonflement-retrait, sont présentés en Figure 4.9. La Figure 4.9a présente les courbes de volume poreux cumulé de l'échantillon de AH à l'état compacté avant le gonflement, après 1 et 4 cycles. Ces courbes montrent que le volume poreux accessible par la porosimétrie au mercure augmente au cours des cycles de gonflement (de 38 % après 1 cycle à 90 % après 4 cycles). La Figure 4.9b présente les courbes de distribution des rayons d'accès de pores des échantillons de AH à l'état compacté avant le gonflement, après 1 et 4 cycles. On trouve que le volume de la famille de pores inter-agrégats compactés centrée vers 8 µm dans l'échantillon avant le gonflement diminue et que le volume de la famille de pores inter-agrégats naturels augmente après le premier gonflement. Cette famille de pores inter-agrégats naturels qui est centrée vers 1 µm n'évolue plus après 4 cycles de gonflement. En plus, le changement en dimension modale de la famille de pores intra-agrégat n'est pas observé au cours des cycles. L'augmentation du volume de pores inter-agrégats dans l'échantillon après 4 cycles par rapport à l'échantillon après 1 cycle peut être expliquée par l'augmentation du nombre des pores inter-agrégats naturels. Pour le sol compacté, les cycles de sollicitations

hydriques n'affectent donc pas la famille de pores intra-agrégat mais entraînent une augmentation du nombre de pores inter-agrégats naturels en divisant des agrégats artificiels du sol compacté au cours des cycles.

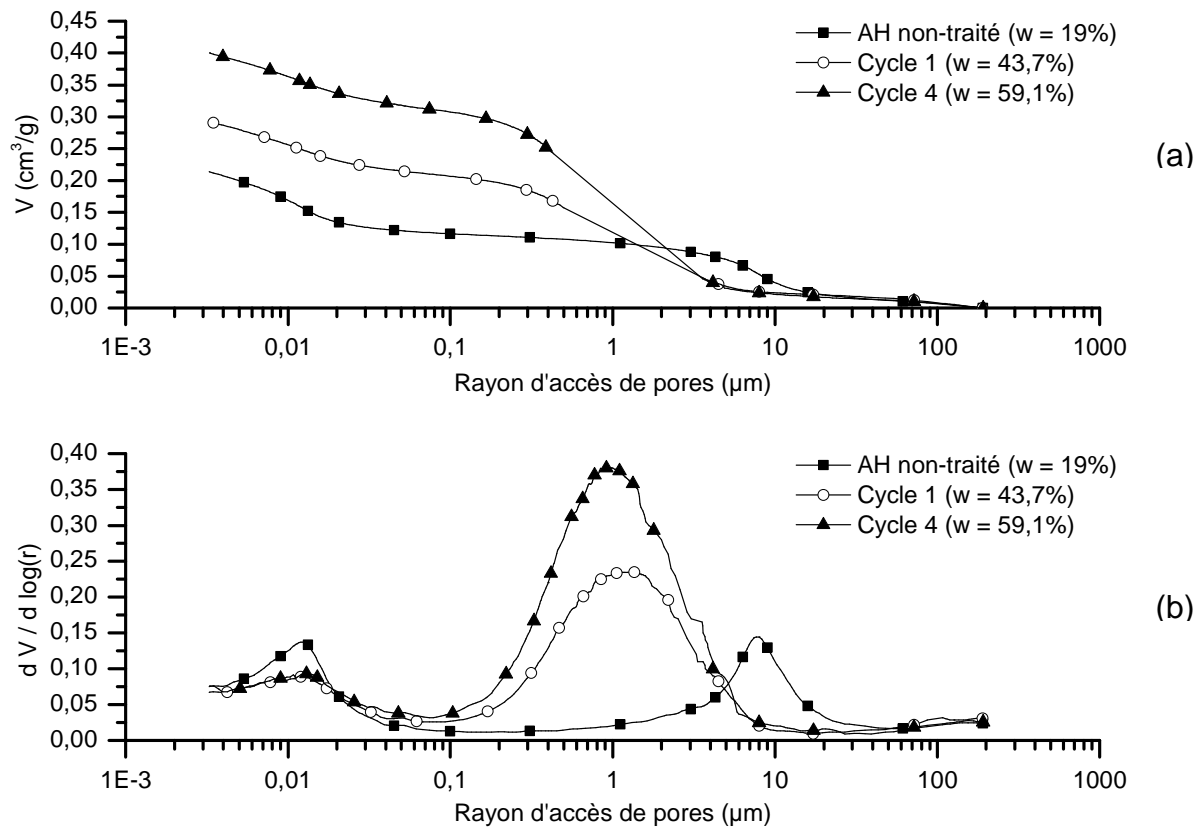
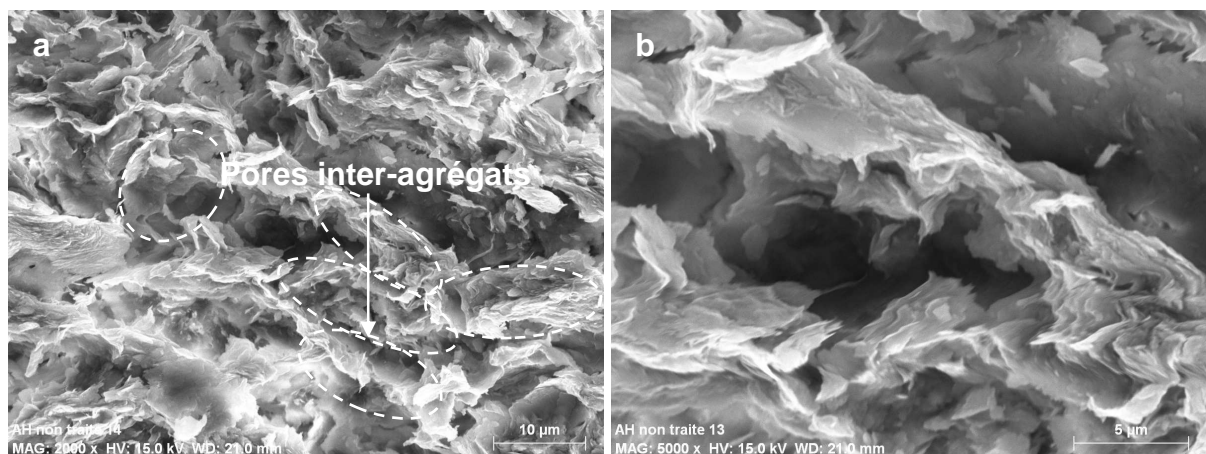


Figure 4.9 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt (AH) compactée non-traitée pour les cycles 1 et 4.

La Figure 4.10 présente les images au MEB des échantillons de AH non-traité après 1 et 4 cycles de gonflement. Sur les Figures 4.10a et b, une structure en agrégats est observée dans l'échantillon compacté de AH après 1 cycle de gonflement. Des pores inter-agrégats sont aussi observés dans ces photos. Pour l'échantillon compacté de AH après 4 cycles de gonflement, une microstructure similaire est observée dans les Figures 4.10c et d avec des agrégats et des pores inter-agrégats.



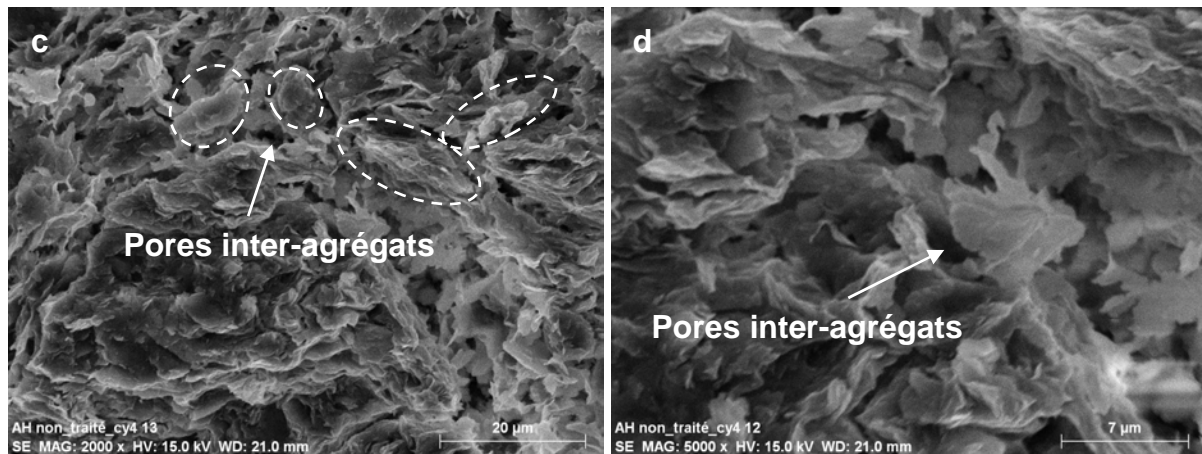


Figure 4.10 : Photos au MEB des échantillons AH compactés non-traités : a, b) après 1 cycle de gonflement ; c, d) après 4 cycles de gonflement

Les résultats des essais porosimétriques sur les échantillons de AH traité à la chaux, après 1 cycle et 4 cycles de gonflement-retrait, sont présentés sur la Figure 4.11. La Figure 4.11a présente les courbes de volume poreux cumulé de l'échantillon de AH traité à la chaux après 1 et 4 cycles. Ces courbes montrent que les volumes poreux accessibles par la porosimétrie au mercure de l'échantillon après 1 cycle et 4 cycles de gonflement sont presque égaux à $0,36 \text{ cm}^3/\text{g}$, ce qui est en accord avec les résultats du gonflement cyclique de AH traité à la chaux. La Figure 4.11b présente les courbes de distribution des rayons d'accès de pores des échantillons de AH traité à la chaux après 1 et 4 cycles. Ils montrent que, après 1 cycle de gonflement, l'échantillon de AH traité à la chaux a deux familles de pores : des pores intra-agrégat centrés vers $0,01 \text{ }\mu\text{m}$ et des pores inter-agrégats (naturels et compactés) centrés vers $3 \text{ }\mu\text{m}$. La famille de pores inter-agrégats compactés est présente dans cet échantillon avec un volume significatif ($0,1 \text{ cm}^3/\text{g}$). Après 4 cycles de gonflement, la taille d'accès de pores inter-agrégats (naturels et compactés) est centrée vers $5 \text{ }\mu\text{m}$, mais une diminution de volume de la famille de pores inter-agrégats naturels et une légère augmentation de volume de la famille de pores inter-agrégats compactés. On trouve que le volume poreux de la famille de pores inter-agrégats (naturels et compactés) ($r > 0,15 \text{ }\mu\text{m}$) représente environ 70 % du volume poreux total pour l'échantillon après 1 cycle de gonflement mais seulement 55 % du volume poreux total pour l'échantillon après 4 cycles de gonflement. On note que le volume total ne change pas après 4 cycles de gonflement. C'est-à-dire après 4 cycles, il y a une augmentation de la taille moyenne des pores inter-agrégats (naturels et compactés) mais une diminution du volume de cette famille de pores. Autrement dit, la quantité de pores inter-agrégats dans le sol diminue relativement après 4 cycles par rapport à la quantité de pores intra-agrégat. Ce phénomène peut être expliqué par le fait qu'après un certain temps de cure, les hydrates se développent et remplissent les pores inter-agrégats et font disparaître ces pores.

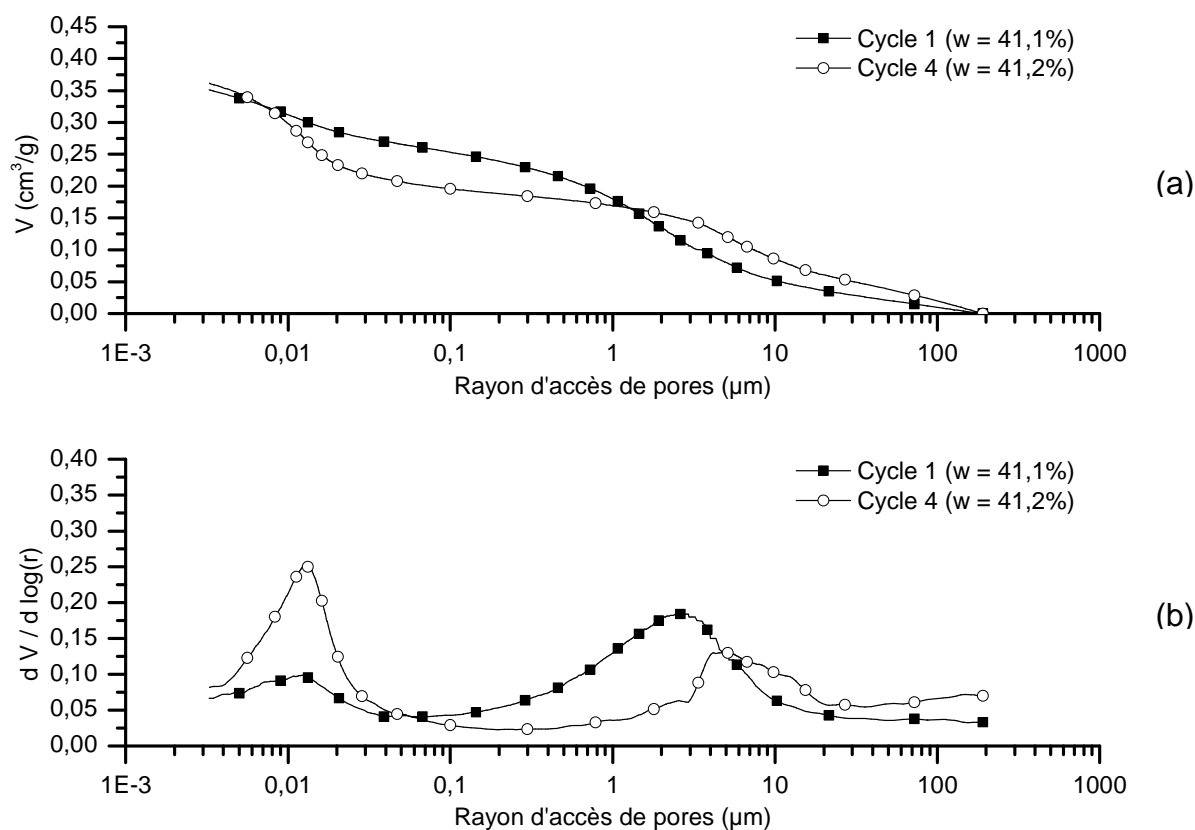
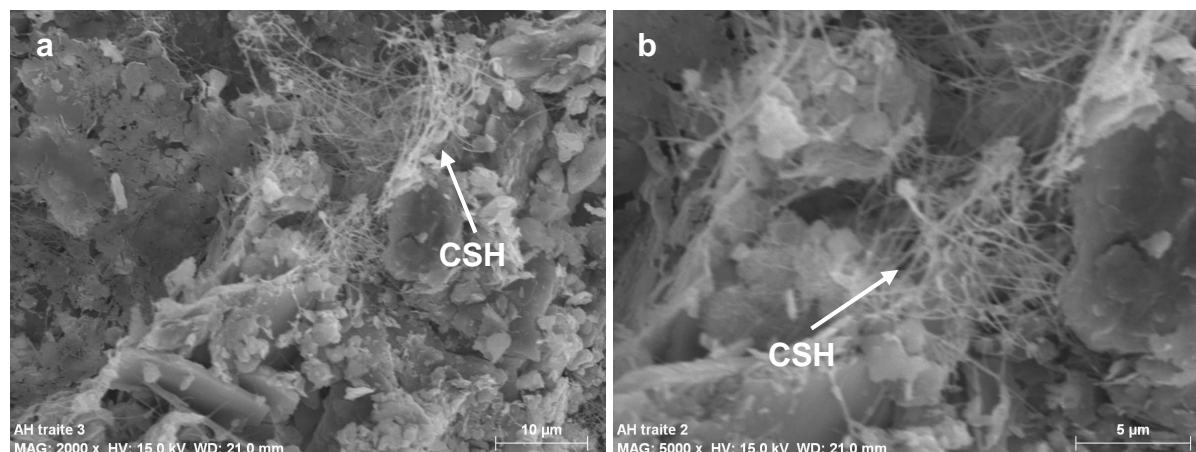


Figure 4.11 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt (AH) compactée traitée à la chaux pour les cycles 1 et 4.

La Figure 4.12 présente les images au MEB des échantillons de AH traité à la chaux après 1 et 4 cycles de gonflement. Pour l'échantillon après 1 cycle de gonflement, à un faible grossissement, la Figure 4.12a montre que la microstructure du sol est aérée et granulaire. Des nouveaux hydrates (CSH) sont observés dans l'échantillon. A plus fort grossissement, les silicates de calcium hydratés (CSH) de forme réticulaire sont observés clairement dans la Figures 4.12b. Pour l'échantillon AH compacté après 4 cycles de gonflement, la Figure 4.12c et la Figure 4.12d montrent que la microstructure de cet échantillon n'est plus aussi aérée et granulaire que celle de l'échantillon après 1 cycle de gonflement. Après 8 mois de cure, les silicates de calcium hydratés (CSH) de forme réticulaire à l'origine évoluent sous forme de plaquettes de CSH. Ces plaquettes de CSH qui relient des agrégats sont observées clairement dans les Figures 4.12c et d.



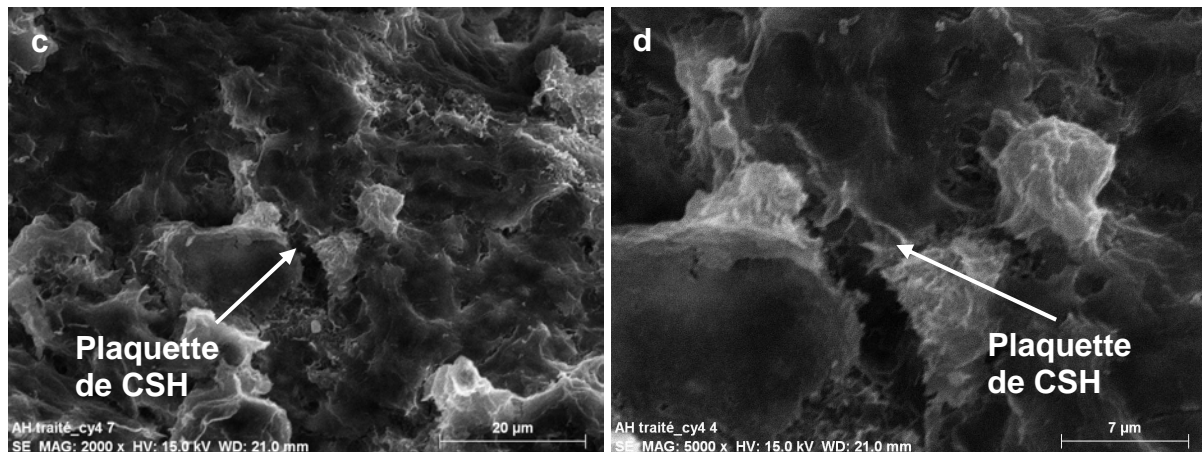


Figure 4.12 : Photos au MEB des échantillons AH compactés traités à la chaux : a, b) après 1 cycle de gonflement ; c, d) après 4 cycles de gonflement

4. Comparaison entre les sols étudiés et conclusions

L'analyse du comportement des sols étudiés au cours de cycles de retrait-gonflement montre que le potentiel de gonflement du sol intact (APM intact) augmente pour le deuxième cycle et diminue pour les cycles suivants tandis que celui du sol compacté (AH compacté) diminue dès le deuxième cycle de gonflement. Pour ces deux sols, les déformations verticales commencent à se stabiliser dès le troisième cycle pour chaque sollicitation cyclique. Cependant, tous ces échantillons, intacts ainsi que compactés, présentent une augmentation progressive du volume due à l'accumulation des gonflements résiduels. Ceci résulte d'une irréversibilité partielle du phénomène de retrait-gonflement. Ces phénomènes sont aussi observés pour les Argiles Vertes de Romainville et pour les Marnes Bleues d'Argenteuil (Yigzaw et al. 2009). On trouve que le sol intact (APM) atteint son état d'équilibre, avec des déformations en retrait et gonflement identiques, après 6 cycles de retrait-gonflement, tandis que pour le sol compacté (AH compacté) semble n'atteindre cet état d'équilibre qu'après trois cycles de retrait-gonflement. Ces résultats sur le sol compacté AH sont similaires à ceux obtenus par Tripathy et al. (2002). En outre, l'ouverture des fissures de retrait au cours du premier séchage de ces échantillons influence la cinétique de gonflement lors des cycles suivants, augmentant la perméabilité du sol, ce qui est en accord avec les observations faites sur les Argiles Vertes de Romainville et sur les Marnes Bleues d'Argenteuil dans Yigzaw et al. (2009) et avec celles de Albrecht et Benson (2001). Al-Homoud et al. (1995) et Day (1994) ont noté également que la perméabilité du sol augmente en fonction du nombre de cycles humidification-séchage. Pour le sol traité à la chaux, les sollicitations hydriques cycliques n'ont aucune influence sur le comportement du sol jusqu'au quatrième cycle.

L'évolution de la microstructure des sols au cours des cycles de retrait-gonflement, est quantifiée par les analyses de porosimétrie au mercure et observée au microscope électronique à balayage. Une augmentation de la taille et du volume des pores est mise en évidence au cours de l'hydratation du matériau intact (dans le cas de APM intact). C'est principalement la porosité inter-agrégats naturels qui est modifiée, avec une transformation progressive et irréversible de la microstructure au cours des cycles successifs de séchage-humidification. L'augmentation du rayon d'accès de la famille de pores inter-agrégats jusqu'au quatrième cycle et une distribution de rayons de pores qui tend à se stabiliser ensuite sont à l'origine de l'évolution du volume poreux des sols sous ces sollicitations hydriques cycliques. Aucune influence sur la famille de pores intra-agrégat n'est observée au cours des cycles de retrait-

gonflement. Pour le sol compacté (dans le cas de l'argile d'Héricourt compactée), l'influence sur la famille de pores intra-agrégat des cycles de sollicitations hydriques n'est pas observée. Ces cycles n'affectent pas la taille des pores inter-agrégats mais entraînent une augmentation du nombre des pores inter-agrégats en divisant des agrégats artificiels du sol compacté, ce qui est à l'origine du changement de volume poreux du sol sous les sollicitations hydriques cycliques. Concernant le sol traité à la chaux, la microstructure du sol traité à la chaux n'est pas affectée significativement par les sollicitations hydriques cycliques mais affectée principalement par le temps de cure ou la réaction pouzzolanique qui crée les nouveaux hydrates en reliant les agrégats et remplissant les pores inter-agrégats en même temps.

On renvoie aussi aux tableaux de synthèse : Tableaux I, III, IV et V en Conclusion générale et perspectives.

Chapitre 5 - *Essais d'infiltration et d'évaporation sur un sol argileux traité à la chaux dans la chambre environnementale*

1. Introduction

Dans les chapitres précédents, les gonflements libres de sols soumis à une simple phase d'imbibition ou à des cycles répétés d'humidification-séchage ont été étudiés en rapport avec les changements microstructuraux. Cependant, ces études sont réalisées seulement à l'échelle de l'éprouvette. Ainsi, l'effet d'échelle sur le comportement du sol est étudié dans ce chapitre en réalisant des essais à plus grande échelle dans une chambre environnementale qui permet d'obtenir des résultats plus proches de situations de terrain.

La chambre environnementale est un grand dispositif qui permet d'imposer des cycles répétés d'humidification-séchage sur un grand échantillon de sol de taille 0,25 m de hauteur, 1,00 m de longueur, 0,80 m de largeur. Cette chambre est choisie pour étudier le comportement au retrait-gonflement du sol à grande échelle en réalisant des essais d'infiltration et d'évaporation. En plus, des paramètres du sol (succion, teneur en eau, température) et de l'air (vitesse du vent, humidité relative, température) sont suivis grâce à plusieurs types de capteurs installés dans la chambre. En parallèle, la microstructure du sol dans la chambre environnementale est aussi analysée après chaque phase d'humification ou de séchage pour la comparer à celle observée à l'échelle de l'éprouvette, utilisant pour cela toujours les techniques de mesure porosimétrique au mercure et l'observation au microscope électronique à balayage.

Dans le cadre de ce travail, l'argile d'Héricourt traitée à la chaux est mise en place dans la chambre environnementale pour analyser le comportement sous sollicitations hydriques cycliques. Les résultats obtenus sont comparés ensuite avec ceux de l'argile d'Héricourt non-traitée dans le travail de Song (2014) et avec ceux de l'argile Verte de Romainville dans le travail de Ta (2009).

Ces travaux ont été réalisés dans la chambre environnementale du laboratoire Navier-Equipe Géotechnique de l'Ecole des Ponts ParisTech dans le cadre d'une collaboration avec le Centre de Géosciences de l'Ecole des Mines ParisTech.

Avant de présenter les résultats obtenus, les dispositifs expérimentaux et les procédures d'essais sont présentés. Ensuite, les résultats d'essais d'infiltration et d'évaporation des sols étudiés sont analysés et exploités pour obtenir le gonflement du sol à la surface, la courbe de rétention d'eau, la courbe de conductivité hydraulique en fonction de la succion. Enfin, l'évolution de la microstructure du sol étudié au cours de l'infiltration et de l'évaporation est présentée.

2. Sol étudié et dispositifs utilisés

2.1. Sol étudié

Le sol choisi pour les essais en chambre environnementale est l'argile d'Héricourt traitée à la chaux. Les résultats de ces essais sont comparés avec ceux obtenus pour l'argile d'Héricourt

non-traitée dans le cadre du travail de Song (2014) et pour l'argile Verte de Romainville dans le cadre du travail de Ta (2009).

Les propriétés géotechniques, minéralogiques, microstructurales et hydriques de l'argile d'Héricourt non-traitée et traitée à la chaux ont été présentées dans le chapitre 1.

La chaux utilisée pour le traitement du sol dans cette étude est la chaux vive (5 % de CaO) comme dans les chapitres précédents.

2.2. Chambre environnementale et capteurs utilisés

Les dispositifs expérimentaux sont constitués principalement d'une chambre environnementale, d'un système de production de vent, d'un collecteur d'air, d'un système d'alimentation d'eau et d'un système d'acquisition de données. Tous les composés des dispositifs utilisés sont représentés sur la Figure 5.1. La vue schématique de la chambre environnementale est présentée dans la Figure 5.2. Cette chambre environnementale comprend le corps principal, la partie de ventilation, la partie de massif de sol, une couche de drainage et un couvercle en acrylique de 8 mm d'épaisseur.

La description détaillée qui suit est tirée du travail de Song (2014).

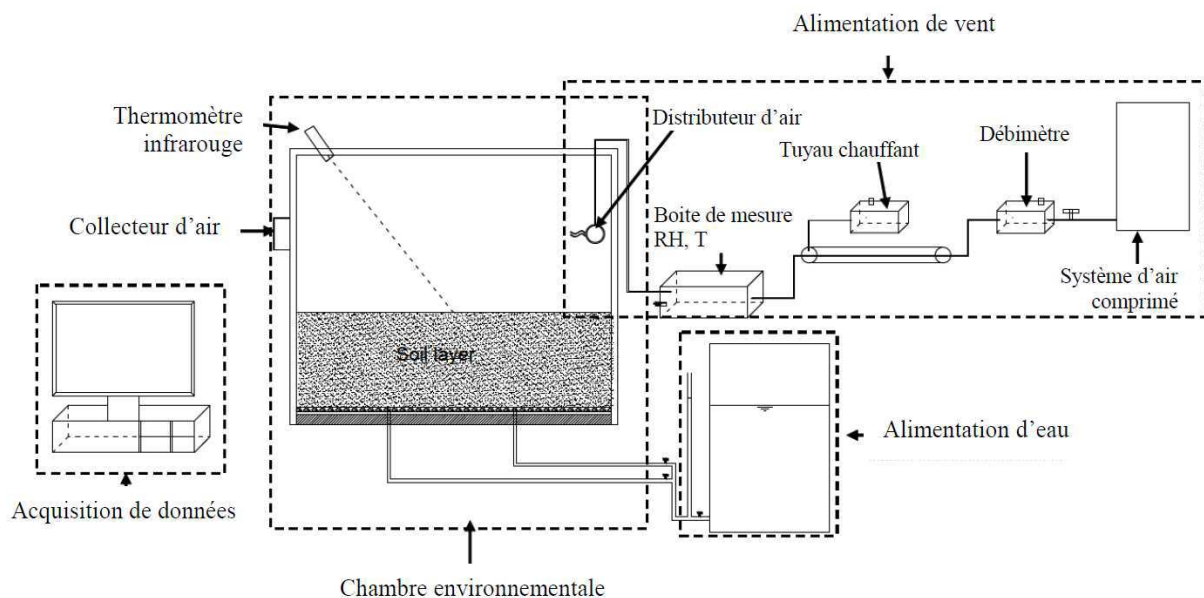


Figure 5.1 : Dispositifs expérimentaux (Song 2014)

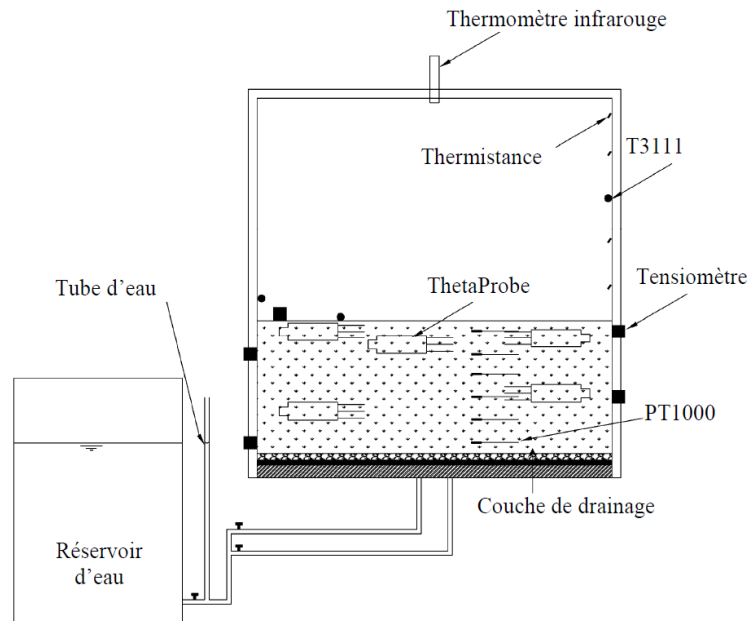


Figure 5.2 : Vue schématique de la chambre environnementale (Song 2014)

En général, le corps de la chambre environnementale se compose de quatre plaques transparentes en acrylique fixées sur une base. Ces quatre plaques de 20 mm d'épaisseur sont maintenues ensemble par de la colle époxy sur les quatre coins. La largeur interne et la longueur interne de la chambre sont de 0,8 m et 1,0 m respectivement. En outre, la colle de silicone est utilisée pour sceller les joints dans les quatre coins de la chambre pour empêcher toute fuite d'air ou d'eau.

Pour le massif de sol, il est compacté sur une couche de drainage. Dans le même temps, des capteurs de mesure de la teneur en eau volumique et de la température du sol sont disposés à différentes profondeurs (Figure 5.2). La couche de drainage est une couche de gravier compacté ($d = 2-4$ mm) de 15 mm d'épaisseur qui est prise en sandwich entre deux couches de géotextile de 1 mm d'épaisseur. Deux trous sont perforés en bas de la couche de drainage pour l'alimentation en eau et le drainage.

Les détails des capteurs utilisés sont présentés dans le Tableau 5.1 et leurs positions de mesure sont montrées dans la Figure 5.2. Ces capteurs sont installés à différentes positions de mesure à la fois dans le massif de sol et dans la partie de ventilation d'air. Les capteurs de mesure de teneurs en eau volumétriques (ThetaProbe) sont enterrés à différentes profondeurs (soit 25 mm, 40 mm, 80 mm, 130 mm et 230 mm de la surface du sol). Trois tensiomètres de haute capacité, avec une plage de mesure de succion de 0 à 1500 kPa (Cui et al. 2008), sont installés sur deux côtés de la paroi à différentes profondeurs (soit 25mm, 77 mm, 173 mm de la surface du sol). Un autre tensiomètre est placé sur la surface du sol pour mesurer la succion de surface. Cinq psychromètres, avec une plage de mesure de succion de 50 à 8000 kPa, sont installés aussi sur deux côtés de la paroi à différentes profondeurs (soit 25mm, 78 mm, 95 mm, 140 mm et 173 mm de la surface du sol). Cinq capteurs de mesure de température du sol (PT1000) sont fixés tous les 50 mm en profondeur. De plus, un thermomètre infrarouge est fixé sur le couvercle pour mesurer la température de la surface du sol. Cinq capteurs T3111, sondes de résistance de mesure d'humidité relative et de température, sont installés à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre. Deux d'entre eux sont placés à l'entrée et à la sortie pour mesurer l'humidité relative et la température de l'air à l'entrée et à la sortie de la chambre environnementale. Pour les trois autres capteurs, l'un est fixé à la paroi de la chambre et sa

position est à mi-distance entre la surface du sol et la plaque de couverture de la chambre, l'autre est mis à l'extérieur de la chambre pour la mesure de l'humidité relative et la température de l'air en laboratoire, et le dernier capteur est placé à 50 mm au-dessus de la surface du sol. Les thermistances de mesure de la température de l'air sont fixées à des hauteurs différentes le long d'un côté de la paroi de la partie de ventilation.

Tableau 5.1 : Capteurs utilisés dans la chambre environnementale

Nom	Fabricant	Modèle	Paramètre mesuré	Etendue de mesure	Précision	No de capteurs
Tensiomètre de haute capacité	ENPC		Succion matricielle	0-1500 kPa		4
Psychromètre	Wescor	Wescor PST-55	Succion totale	50– 8000 kPa	± 0,03 MPa	5
Sonde de résistance	Elcowa	T3111	Humidité relative Température	0-100 % -30-150 °C	±2.5 % ±0.4 °C	5
ThetaProbe	Delta-T	ML2x	Teneur en eau volumique	0-100 %	±1.0 %	5
Sonde à résistance de platine	Correge	PT1000	Température	0-100 °C	±0.3 °C	5
Thermistance	Radiospare	DO-35	Température	-40-250 °C	±1.0 %	5
Thermomètre infrarouge	Calex	Pyropen-D	Température	-20-250 °C	±1.0 %	1
Capteur différentiel des variables linéaires	FGP	DX20E L	Déplacement	0-50 mm	±0,125 mm	12
Anémomètre	Testo	435	Vitesse du vent	0-20 m/s	±0.03 m/s	1
Débitmètre	Kobold	MAS-3120	Débit	0-500 L/min	±1.5 %	1

Pour suivre le gonflement du massif de sol au cours d'un essai d'infiltration, 12 capteurs de mesure de déplacement (LVDT) sont installés à différentes positions sur la surface du sol de section 1,0 m x 0,8 m.

Le système d'alimentation de vent (Figure 1) permet de contrôler les conditions d'air à l'entrée : sa température et son débit. Ce système se compose de cinq parties : (1) source d'air comprimé, (2) débitmètre, (3) tuyau chauffant de l'air, (4) boîte de mesure de l'humidité relative et de la température d'air, (5) distributeur d'air. L'air comprimé est fourni par un dispositif du laboratoire. Le débit d'air est contrôlé par une vanne et est suivi par un débitmètre dont l'étendue de mesure varie de 0 à 500 L/min. L'air comprimé est chauffé par un tuyau chauffant avec une régulation de la température. Cet appareil permet de chauffer l'air jusqu'à 250 °C. La boîte de mesure de l'humidité relative et de la température de l'air est une cellule en matière plastique rigide dans laquelle une sonde de résistance T3111 est insérée. Le distributeur d'air est un tube métallique sur lequel huit trous de 8,4 mm de diamètre ont été forés sur sa longueur avec un intervalle de 100 mm pour donner un flux d'air le plus homogène possible.

Le collecteur d'air a la forme d'une demi-boîte cubique en polyvinyle chlorure (755 mm de longueur, 30 mm de largeur et 100 mm de hauteur) et est monté sur la paroi opposée au distributeur d'air. Cinq trous de 25 mm de diamètre sur la paroi permettent à l'air de la chambre d'entrer dans le collecteur, équipé d'une sonde de résistance T3111 pour mesurer à la fois l'humidité relative et la température de l'air sortant de la chambre.

La température en surface du sol est suivie par un thermomètre infrarouge installé sur le couvercle de la chambre environnementale. Il mesure la température moyenne d'une zone de 50 mm de diamètre. Il faut noter qu'au début de l'essai d'évaporation, la température mesurée par ce capteur est la température de l'eau présente en surface du sol. Puis, il assure le suivi de la température du sol.

En outre, des fissures peuvent apparaître et se développer à la surface du sol au cours du séchage. Ainsi, un appareil photo numérique muni d'un objectif grand angle et de haute résolution est installé au dessus de la chambre environnementale. Cet appareil peut couvrir entièrement la surface du sol. Il faut noter qu'un couvercle transparent est utilisé pendant la phase de séchage pour assurer la bonne qualité de l'image.

Tous les capteurs ainsi que l'appareil photo numérique sont connectés à un ordinateur pour avoir une acquisition automatique.

Le système d'alimentation d'eau de la chambre environnementale est composé d'un réservoir d'eau en plastique et d'un tube de mesure du niveau d'eau, en verre avec des marques. Ce tube est connecté avec le réservoir d'eau, ainsi un changement de niveau d'eau dans le réservoir ou dans le massif de sol dans la chambre peut être identifié rapidement.

Dans la suite du mémoire, différents paramètres physiques sont suivis, concernant le sol ou l'air au-dessus du sol. La surface du sol est le niveau de référence 0. Les différents niveaux de sol sont donc repérés avec une cote négative. A l'inverse les cotes sont positives au-dessus du niveau de référence.

2.3. Procédure expérimentale

L'argile d'Héricourt est d'abord séchée à l'air libre, broyée et tamisée à 2 mm. Elle est ensuite stockée dans un tonneau hermétique afin d'être homogénéisée avant le traitement et le compactage. La teneur en eau après cette phase est de 8,5 %. On note que le traitement du sol avec de la chaux vive dans cette étude est réalisé à l'état « sec ». Pour ce faire, le sol « sec » ($w = 8,5 \%$) est mélangé avec 5 % de chaux vive en plusieurs petites parties avant d'être compacté couche par couche dans la chambre environnementale. Chaque couche a 50 mm d'épaisseur. Ainsi, une colonne de sol de 250 mm est compactée à une masse volumique sèche de $1,4 \text{ Mg/m}^3$, une valeur proche de celle in-situ. Cette procédure permet d'obtenir une homogénéité satisfaisante en termes de variations de la masse volumique sèche.

Pendant le compactage, tous les capteurs ont été installés dans le sol et sur les parois à leurs positions comme décrit dans la section 2.2 sauf les tensiomètres de haute capacité qui sont installés seulement après la phase d'infiltration. A la fin du compactage, 12 capteurs LVDT sont installés pour mesurer les déplacements de la surface du massif de sol pendant la première phase d'infiltration.

Après le compactage du sol et l'installation de capteurs, deux cycles d'humidification-séchage sont réalisés. Pour le premier cycle, le massif de sol est saturé par une pluie artificielle à un

débit de 0,5 L/min. La pluie est arrêtée quand on atteint une couche d'eau environ 5 cm à la surface du sol. Cette couche d'eau est maintenue par rajout d'eau jusqu'à la saturation totale de toute la colonne de sol. Les mesures des capteurs de teneur en eau volumique et de succion donnant l'état hydrique du massif de sol montrent que le massif de sol est saturé totalement après un jour d'infiltration.

Après la phase d'humidification du sol, l'essai d'évaporation est réalisé dans la chambre environnementale sous conditions atmosphériques contrôlées (température d'air entré et vitesse du vent) grâce au système d'alimentation de vent. L'air comprimé à haute pression fourni par ce système, avec une faible humidité relative de 0 à 5 %, est chauffé avant d'entrer dans la chambre environnementale. Cet air sec et chaud favorise donc un séchage intensif et rapide du massif de sol. Les mesures, par des capteurs, de l'humidité relative et de la température de l'air à l'entrée et à la sortie de la chambre environnementale seront utilisées pour déterminer le bilan d'humidité de l'air, donc l'évaporation du sol.

Au cours de la phase d'évaporation, trois niveaux d'eau sont appliqués au massif de sol en changeant le niveau d'eau dans le réservoir du système d'alimentation. Au début de l'évaporation, le niveau d'eau dans le réservoir est maintenu à 3 cm au-dessus de la surface de sol. Ensuite, ce niveau d'eau est abaissé au niveau du milieu du massif de sol, puis de 2 cm au-dessus de la base du massif de sol. Chaque niveau d'eau est maintenu constant pendant l'essai d'évaporation jusqu'à stabilisation des mesures de teneur en eau volumique à différentes positions du massif du sol. Pour ce faire, l'eau est rajoutée dans le réservoir fréquemment au cours de l'essai et la quantité ajoutée est enregistrée.

Il faut noter que pour resaturer le massif de sol après le premier séchage, la pluie artificielle n'est pas utilisée mais on augmente le niveau d'eau dans le réservoir en le maintenant à 3 cm au-dessus de la surface de sol. Ce niveau est aussi maintenu jusqu'à ce que les mesures des capteurs de teneur en eau volumique indiquent une stabilisation de teneur en eau à toutes les profondeurs du massif de sol. Après cette stabilisation de la teneur en eau volumique, de l'eau supplémentaire est versée sur la surface du sol pour maintenir une couche d'eau de 5 cm comme pour la première phase d'humidification. Le deuxième séchage est réalisé ensuite suivant une procédure similaire à celle du premier séchage.

Après chaque phase d'infiltration ou d'évaporation de chaque cycle, une petite colonne de sol de 30 mm de section est prélevée pour les études de microstructure par l'essai porosimétrique au mercure et l'essai au MEB décrit dans le chapitre 1. Cette étude microstructurale permet d'analyser l'évolution de microstructure du sol étudié pour différents états hydriques au cours des phases d'humidification et de séchage dans la chambre environnementale et est présentée dans la section 4 de ce chapitre.

Les deux séchages dans cette étude sont effectués dans des conditions atmosphériques contrôlées qui sont présentées dans le Tableau 5.2. Il faut noter que la température générée par le tuyau chauffant est de 200 °C pour les deux séchages mais que la température de l'air à l'entrée de la chambre environnementale est d'environ 60 °C. Le débit d'air entré à 130 L/min pour le séchage 1 correspond à une vitesse moyenne du vent de 0,2 m/s et le débit d'air entré à 95 L/min pour le séchage 2 correspond à une vitesse moyenne du vent de 0,1 m/s.

Tableau 5.2 : Conditions des essais d'évaporation

Essai	Débit d'air entré	Température générée
	(L/min)	(°C)
Séchage 1	130 et 110	200
Séchage 2	95	200

3. Développement des profils hydriques

3.1. Infiltration

L'ensemble des résultats obtenus pendant les phases d'infiltration des deux cycles d'humidification-séchage est présenté dans cette partie. Pour rappel, l'humidification du massif de sol du premier cycle a été réalisée en maintenant une couche d'eau d'environ 5 cm à la surface du sol mais pour le deuxième cycle, l'humidification du sol est effectuée en maintenant le niveau d'eau dans le réservoir à 3 cm au-dessus de la surface de sol. Un jour a été nécessaire pour la première phase d'humidification, mais 15 jours ont été nécessaires pour la deuxième phase d'humidification pour saturer totalement le massif du sol.

3.1.1 Evolution des paramètres au cours de l'infiltration 1

L'évolution dans le temps des différents paramètres : humidité relative, teneur en eau, succion, température dans le sol et gonflement à la surface au cours de la première phase d'infiltration est présentée. Les résultats similaires de la deuxième phase d'infiltration sont ensuite analysés dans la partie suivante.

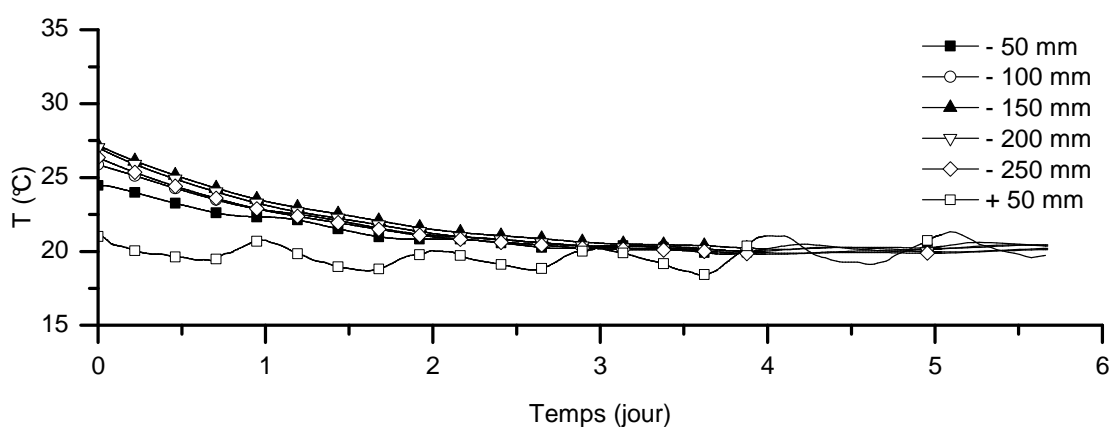
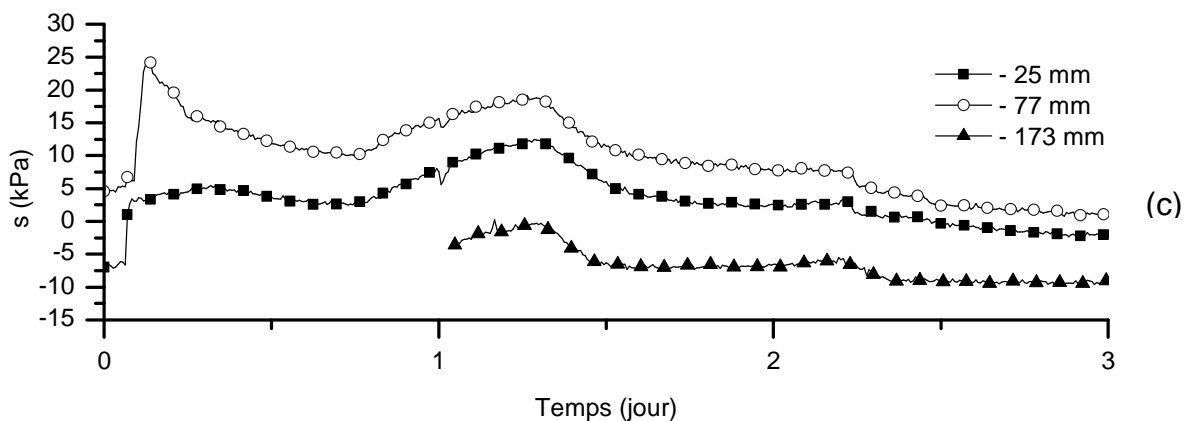
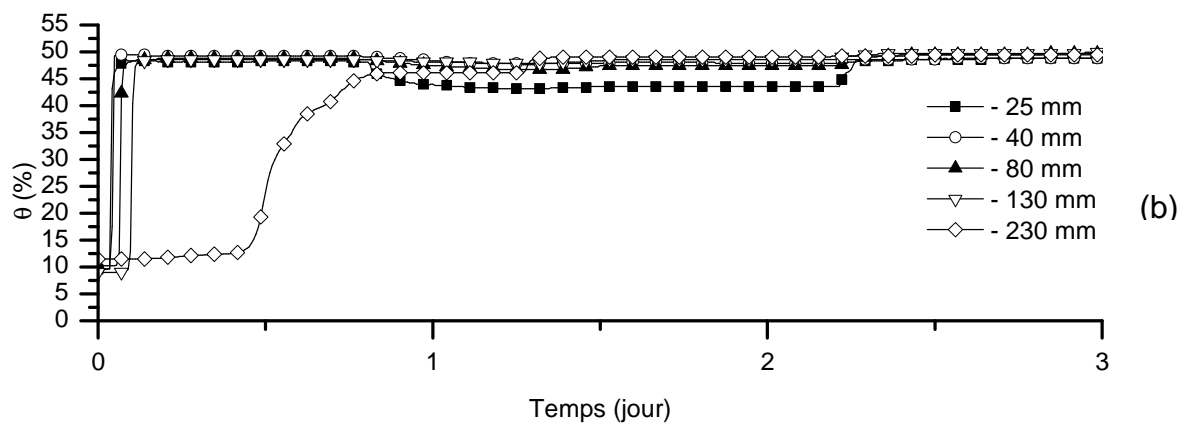
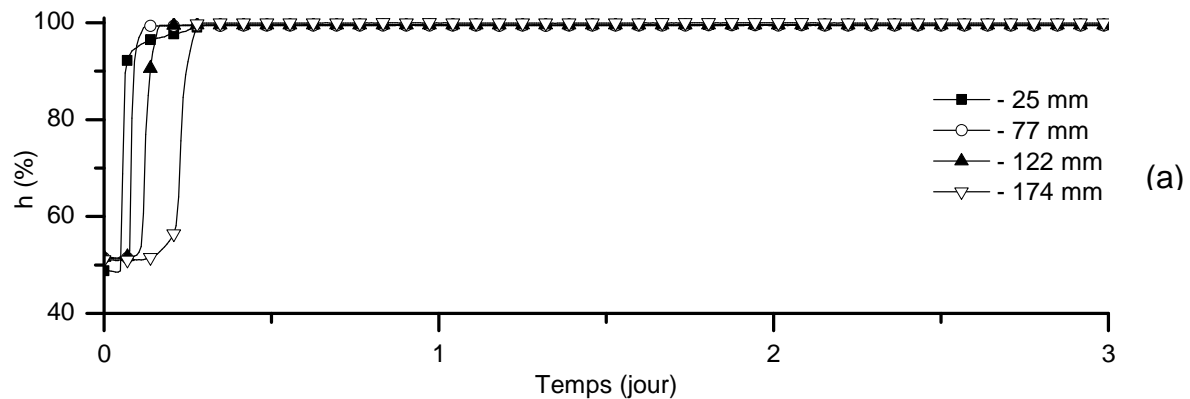


Figure 5.3 : Evolution de la température du sol et de l'air au cours du temps après le compactage (avant le commencement de l'infiltration 1)

L'état d'équilibre après le compactage ($t = 0$ Figure 5.3) est atteint après environ 3 jours quand la température mesurée dans le massif de sol à tous les niveaux, par les capteurs PT1000, est de 20 °C. Il faut noter que la réaction entre le sol et la chaux se produit tout de suite après le mélange du sol et de la chaux et pendant le compactage, même si la teneur en eau massique du sol à ce moment là était très basse : 8,5 %. Autrement dit, le phénomène d'hydratation de la chaux se produit même avec le traitement à la chaux du sol à l'état relativement sec (8,5 % de teneur en eau massique dans ce cas) et il dure environ 3 jours. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de température du sol jusqu'à 27 °C observée après le compactage dans la Figure 5.3, pour tous les niveaux sauf le niveau -50 mm dont la température est un peu moins élevée (25 °C) à cause de la proximité de ce niveau avec l'air de

la chambre. Ces valeurs de température diminuent progressivement et se stabilisent à la valeur de la température de l'air après 3 jours. Quant à la température de l'air au niveau 50 mm au-dessus de la surface du sol, elle est environ de 20 °C au long de cette période, ce qui confirme encore une fois que l'augmentation de température observée dans le massif du sol vient du phénomène d'hydratation de la chaux vive. On note que cette hydratation de la chaux vive dans le sol à l'état relativement sec provoque aussi un léger gonflement du massif de sol, d'environ 10 mm, mesuré par la règle sur la paroi de la chambre environnementale.

Quant à la teneur en eau volumique à la fin du compactage ou au début de la première phase d'infiltration ($t = 0$ Figure 5.4b), elle est de 10 ± 1 % pour les mesures par Thetaprobe. Il faut noter que la teneur en eau massique du sol avant le compactage est 8,5 % et le mélange du sol et de la chaux cause une diminution d'environ 1 % de teneur en eau massique. D'après la relation entre la teneur en eau massique de sol après le mélange ($w = 7,5$ %) et la teneur en eau volumique ($\theta = w \cdot \rho_d / \rho_w$ avec la masse volumique sèche compactée de $\rho_d = 1,4 \text{ Mg/cm}^3$), on constate donc la validité des teneurs en eau volumiques mesurées par les capteurs Thetaprobe.



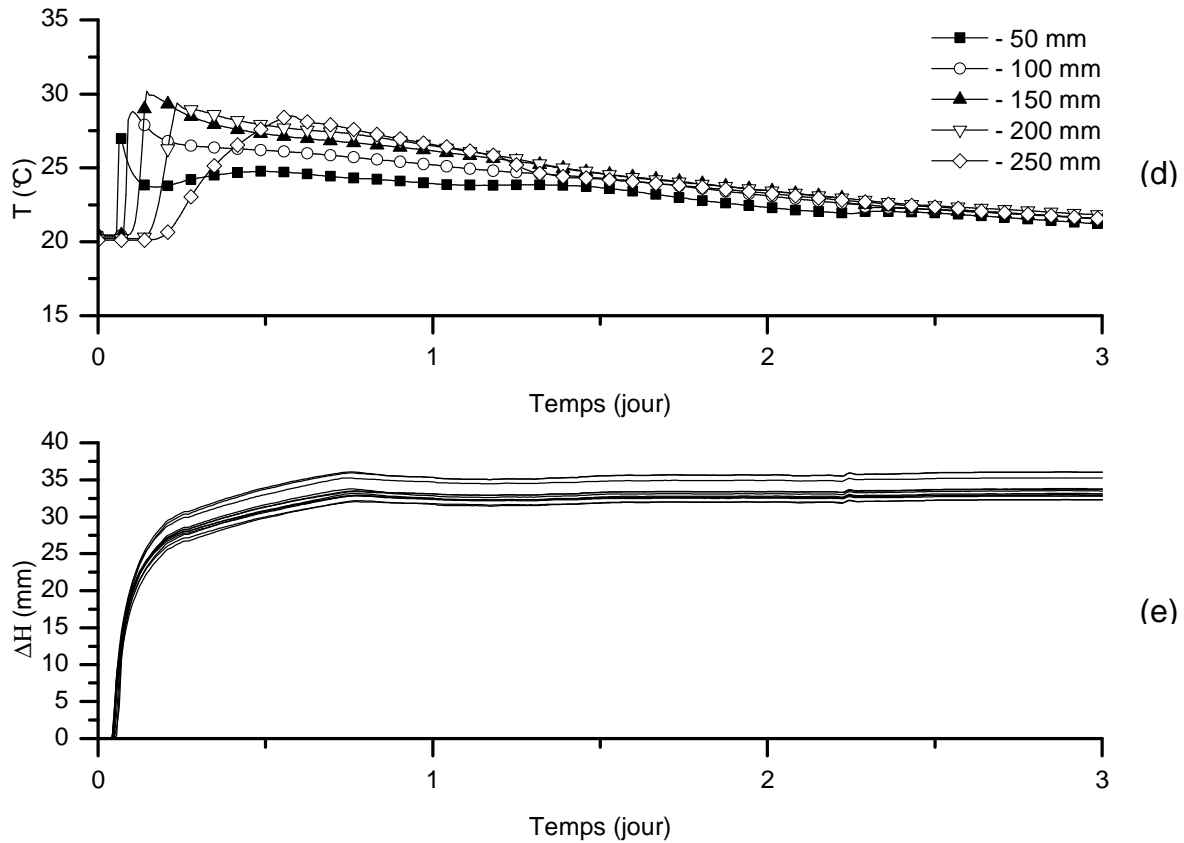


Figure 5.4 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour l'infiltration 1

Les résultats obtenus pendant la première phase d'humidification sont présentés en termes de variations de l'humidité relative (h) (Figure 5.4a), de la teneur en eau volumique mesurée par capteurs ThetaProbe (θ) (Figure 5.4b), de la succion mesurée par capteurs Tensiomètre (s) (Figure 5.4c), de la température mesurée par capteurs PT1000 (T) (Figure 5.4d) et du gonflement à la surface du massif de sol (Figure 5.4e). Il faut noter que le moment où la pluie artificielle commence est décalé de quelques minutes par rapport à $t = 0$ dans la Figure 5.4. Ce moment correspond au moment où tous les paramètres dans la Figure 5.4 commencent à augmenter. Ces évolutions permettent de faire les remarques suivantes.

Le démarrage de l'infiltration provoque tout de suite des changements radicaux des paramètres dans la zone proche de la surface et ensuite dans la zone plus profonde. En effet, l'humidité relative h mesurée par le capteur au niveau -25 mm (le plus proche de la surface du sol) commence à augmenter tout de suite après l'infiltration, suivi par l'augmentation de l'humidité relative mesurée par les capteurs aux niveaux plus profonds (-77 mm, -122 mm et -174 mm). Les valeurs de l'humidité relative aux niveaux mesurés atteignent 100 % après quelques heures (Figure 5.4a).

L'infiltration d'eau à la surface du massif de sol provoque une réponse similaire pour les capteurs de mesure de teneur en eau volumique ThetaProbe (Figure 5.4b). En effet, le début de l'infiltration entraîne une augmentation quasi immédiate de la teneur en eau mesurée par le capteur au niveau -25 mm (de 10 à 48 %), suivi par l'augmentation des valeurs de teneur en eau aux niveaux plus bas -40 mm, -80 mm, -130 mm. Pour la valeur de teneur en eau au niveau près du fond de la chambre environnementale (-230 mm), cette valeur commence à augmenter après 0,5 jour. Pendant la période $t = 0,5 - 1,3$ jours où la couche d'eau à la surface est toute absorbée mais l'eau n'est pas encore rajoutée, les valeurs de teneur en eau

mesurées par les capteurs près la surface sont en légère diminution. Cette période se reconnaît clairement dans l'évolution de la succion présentée dans le paragraphe suivant. L'eau est ensuite rajoutée à la surface et les valeurs de teneur en eau augmentent légèrement à tous les niveaux et se stabilisent à 49 % au bout de 3 jours. Il faut noter que ces valeurs continuent encore à augmenter au cours du temps et atteignent 51 ± 1 % au début de la phase de séchage 1. On note que la valeur de teneur en eau saturée estimée du sol dans la chambre environnementale est de 56 %, ce qui correspond pour une masse volumique des particules solides de $2,7 \text{ Mg/m}^3$, à une masse volumique sèche initiale de $1,4 \text{ Mg/m}^3$ en comptant les 35 mm de gonflement (Figure 5.4e) avec 10 mm de gonflement après le compactage (45 mm de gonflement en total). Cette valeur est un peu plus élevée que la valeur mesurée, ce qui montre le fonctionnement délicat, dans la gamme importante de mesure de teneur en eau volumique, des capteurs ThetaProbe (Ta 2009).

La Figure 5.4c présente l'évolution de la succion aux trois niveaux dans le massif du sol. Seules les mesures par les tensiomètres dans la faible gamme de succions sont disponibles. Pour la mesure au niveau -173mm, elle est disponible à partir de $t = 1$ jour parce que le tensiomètre à ce niveau est installé après un jour d'infiltration au moment où le sol à ce niveau est déjà saturé. La valeur de succion mesurée des tensiomètres aux trois niveaux est autour de 0 après 3 jours d'infiltration, ce qui confirme la saturation totale du massif de sol. On remarque que pendant la période d'arrêt d'alimentation d'eau ($t = 0,5 - 1,3$ jours), la succion mesurée par les trois tensiomètres augmente légèrement, montrant le séchage du massif de sol.

La variation de la température du sol mesurée par les capteurs PT1000 est présentée sur la Figure 5.4d. Une augmentation de la température du massif de sol à cause des phénomènes d'hydratation de la chaux est observée tout de suite après l'infiltration d'eau depuis la surface de sol. On trouve que l'hydratation qui se produit quand de la chaux dans le sol est en contact avec de l'eau cause une augmentation de température jusqu'à 30°C au milieu du massif de sol (-150 mm). Pour les valeurs de température du sol aux niveaux près de la surface et près du fond, elles atteignent des valeurs moins élevées, soit à cause de la ventilation au dessus du massif de sol, soit à cause des échanges de température entre des couches de sol dans le massif. Plus le capteur est profond, plus l'augmentation de température mesurée commence tard et plus le taux d'augmentation est faible. On trouve que toutes les valeurs de température mesurées à différentes profondeurs du massif de sol se stabilisent à la température ambiante de 20°C après 3 jours. Ceci montre que la durée du phénomène d'hydratation de la chaux qui a lieu à l'échelle de la chambre environnementale est d'environ 3 jours et cette durée est égale à celle du phénomène d'hydratation à l'échelle de l'éprouvette (chapitre 1).

Le gonflement commence quasiment immédiatement après l'humidification du massif de sol (Figure 5.4e). Il atteint tout de suite 25 mm après quelques heures et continue d'augmenter, puis se stabilise à 35 mm après environ un jour. Ce gonflement immédiat est dû à l'effet de l'expansion de la chaux et de la hausse de température dans le massif de sol au cours de l'hydratation (chapitre 1). Il faut noter que le massif du sol traité à la chaux dans la chambre environnementale avait commencé à gonfler tout de suite après le compactage à cause de la réaction entre la chaux dans le sol et la vapeur d'eau dans l'environnement, ce qui est confirmé par l'augmentation de la température dans la période après le compactage (Figure 5.3). Le gonflement du massif de sol observé pendant la période avant la phase d'infiltration est d'environ 10 mm. Le gonflement total du massif de sol est donc d'environ 45 mm, ce qui correspond à un taux de gonflement de 18 %. Pendant l'arrêt de l'alimentation en eau ($t = 0,5 - 1,3$ jours), la surface du sol s'abaisse légèrement, puis revient au niveau correspondant à la période où l'eau est en permanence à la surface du sol.

On note également que les différentes mesures de gonflement, à différentes positions de la surface du sol, permettent de montrer l'évolution de la surface du sol en image 3-D (Figure 5.5). En se basant sur les résultats acquis par les 12 capteurs LVDT (Figure 5.4e) et sur la mesure effectuée à l'aide d'une règle sur la paroi acrylique transparente de la chambre environnementale, le gonflement à la surface du sol à $t = 3$ jours est présenté en 3-D (Figure 5.5). Le gonflement maximal (35-37 mm) se situe au milieu tandis que le gonflement minimal (29 - 31 mm) est relevé dans les quatre coins de la chambre environnementale. Le gonflement proche des parois reste inférieur à 33 mm. Le gonflement différentiel à la surface est observé clairement à l'échelle de la chambre environnementale.

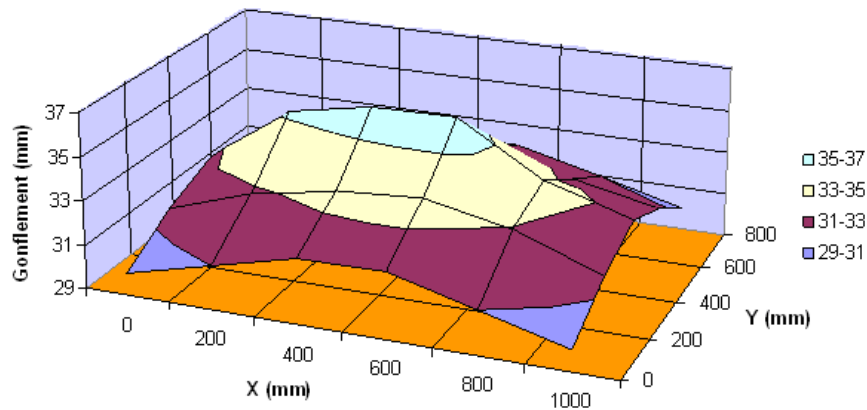
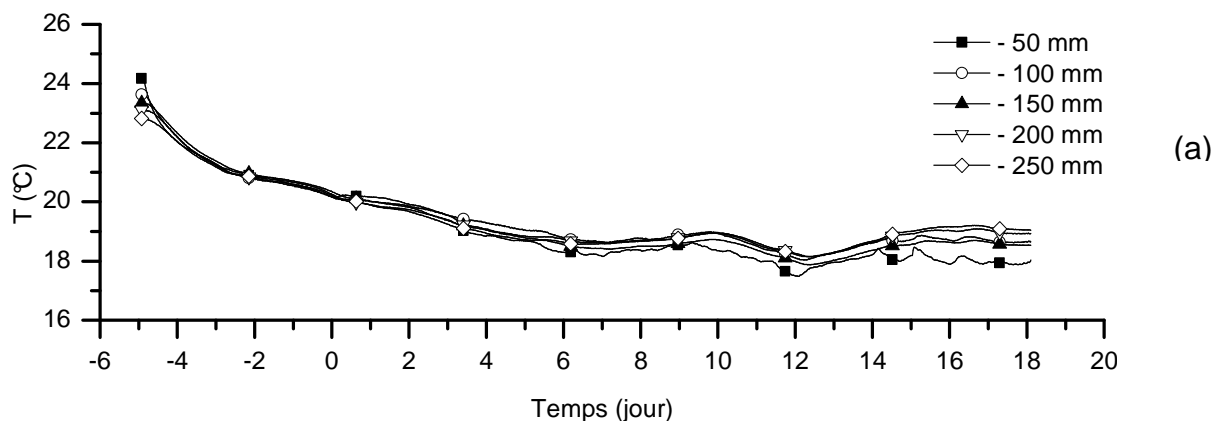


Figure 5.5 : Gonflement 3-D à la surface du sol (à $t = 3$ jours après l'infiltration 1)

3.1.2 Evolution des paramètres au cours de l'infiltration 2

Les résultats obtenus pendant la deuxième phase d'humidification sont présentés : température mesurée par capteurs PT1000 (T) (Figure 5.6a), teneur en eau volumique mesurée par capteurs ThetaProbe (θ) (Figure 5.6b), succion mesurée par capteurs Tensiomètre (s) (Figure 5.6c). Malheureusement, le gonflement à la surface du massif de sol n'est pas suivi pendant cette phase d'humidification. On trouve cependant que le gonflement du massif de sol au cours de la deuxième phase d'humidification n'est pas significatif par référence aux mesures à partir des règles sur la paroi transparente de la chambre environnementale. Il faut noter que les résultats de la Figure 5.6 sont présentés à partir de l'arrêt de la phase de séchage 1. Le moment $t = 0$, dans cette Figure, correspond au moment où le niveau d'eau dans le réservoir est augmenté et maintenu constant à 3 cm au-dessus de la surface du sol.



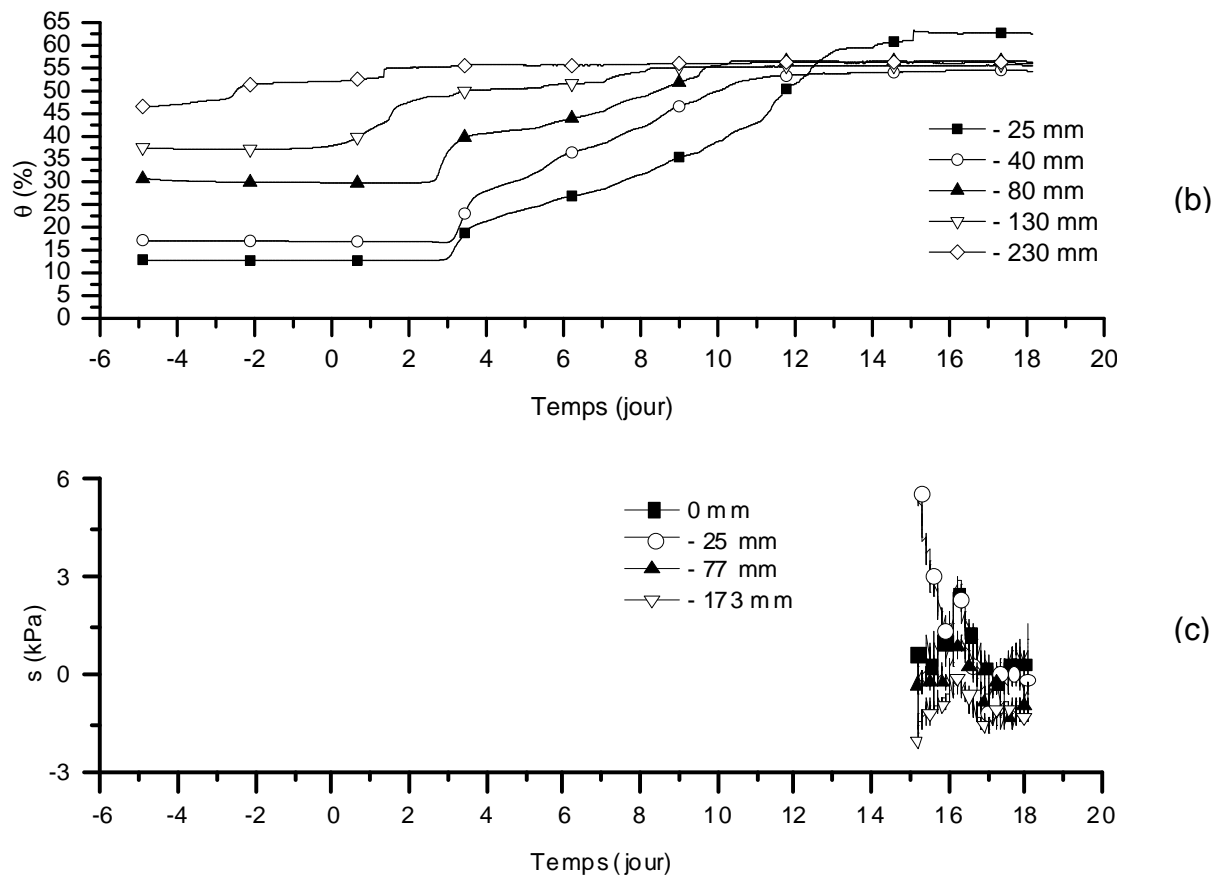


Figure 5.6 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour l'infiltration 2

La variation de la température du sol mesurée par les capteurs PT1000 est présentée sur la Figure 5.6a. Sur cette figure, on trouve que la température du sol est encore élevée (24 °C) à la fin du séchage 1. Elle diminue progressivement et s'équilibre à la température d'ambiance (20 °C) après 5 jours. Après la période d'équilibre de 5 jours, la deuxième phase d'infiltration commence avec la montée du niveau d'eau dans le réservoir ($t = 0$). La température mesurée par les capteurs diminue légèrement à environ 19 °C, ce qui correspond à la température de l'eau dans le sol. Pendant cette phase d'humidification, il n'y a plus d'augmentation de la température du sol comme dans la première phase d'infiltration, ce qui montre qu'il n'y a plus de phénomène d'hydratation de la chaux dans le massif de sol au deuxième cycle d'humidification.

Sur la Figure 5.6b, on trouve une différence de teneur en eau du sol aux différents niveaux dans le massif de sol à la fin de séchage 1. La teneur en eau volumique du sol près de la surface (niveau -25 mm et -40 mm) à la fin de séchage 1 est d'environ 15 %, ce qui montre que le phénomène d'évaporation se produit principalement sur une couche de sol de 40 mm près de la surface. Plus le niveau est profond, plus la teneur en eau est importante. Le sol au fond de la chambre environnementale reste encore presque saturé après le séchage 1 et sa teneur en eau volumique est de 47 %. Pendant la période d'équilibre entre le séchage 1 et l'humidification 2, les valeurs de teneur en eau aux différents niveaux restent constantes, sauf la valeur de teneur en eau près du fond au niveau -230 mm qui augmente un peu à cause de la connection permanente avec l'eau dans le réservoir. On rappelle que la pluie à la surface de sol n'est plus utilisée dans la deuxième phase d'infiltration, mais l'eau dans le réservoir est connectée en permanence au fond de la chambre environnementale et remplacée pour saturer

le massif de sol. On trouve alors que plus le capteur de mesure de teneur en eau volumique est près de la surface, plus l'augmentation de teneur en eau mesurée commence tard et plus le taux d'augmentation est faible. Au bout de 15 jours les valeurs de teneur en eau à tous les niveaux se stabilisent. L'eau est ensuite rajoutée à la surface du sol pour obtenir une couche d'eau de 3 cm d'épaisseur au début de la phase de séchage 2. A la fin de la deuxième phase d'infiltration, la teneur en eau mesurée par le capteur près de la surface est de 62 % tandis que les teneurs en eau mesurées par les capteurs plus profonds sont d'environ 56 %. Cette différence montre que le sol près de la surface gonfle plus que le sol plus en profondeur. En outre, il faut noter que ces valeurs sont plus importantes que celles à la fin de la première phase d'infiltration et égales à la valeur de teneur en eau de saturation estimée à 56 %, ce qui correspond pour une masse volumique des particules solides de $2,7 \text{ Mg/m}^3$, à une masse volumique sèche initiale de $1,4 \text{ Mg/m}^3$ en considérant 35 mm de gonflement (Figure 5.4e) plus 10 mm de gonflement après le compactage.

La Figure 5.6c présente l'évolution de la succion de la surface et aux trois niveaux dans le massif du sol. Seules les mesures par les tensiomètres à partir du quinzième jour de la deuxième phase d'infiltration sont disponibles parce que ces tensiomètres sont installés après la saturation du massif de sol. La valeur de succion mesurée par les tensiomètres est autour de 0 après 15 jours d'infiltration, ce qui confirme encore une fois la saturation totale du massif de sol.

3.2. Séchage

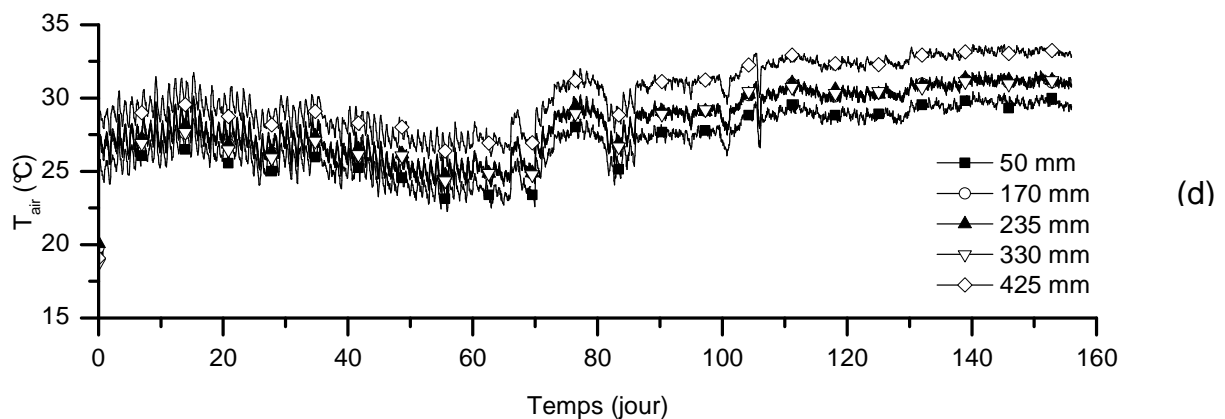
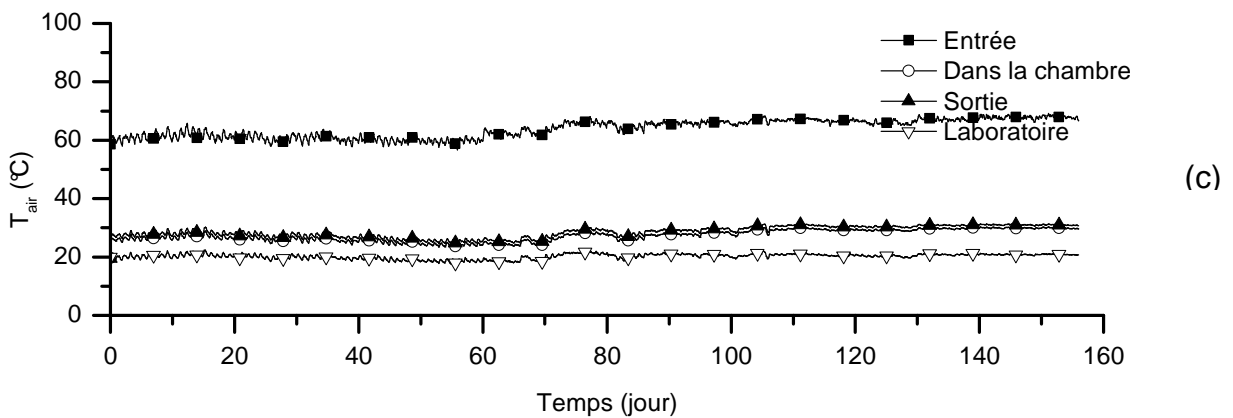
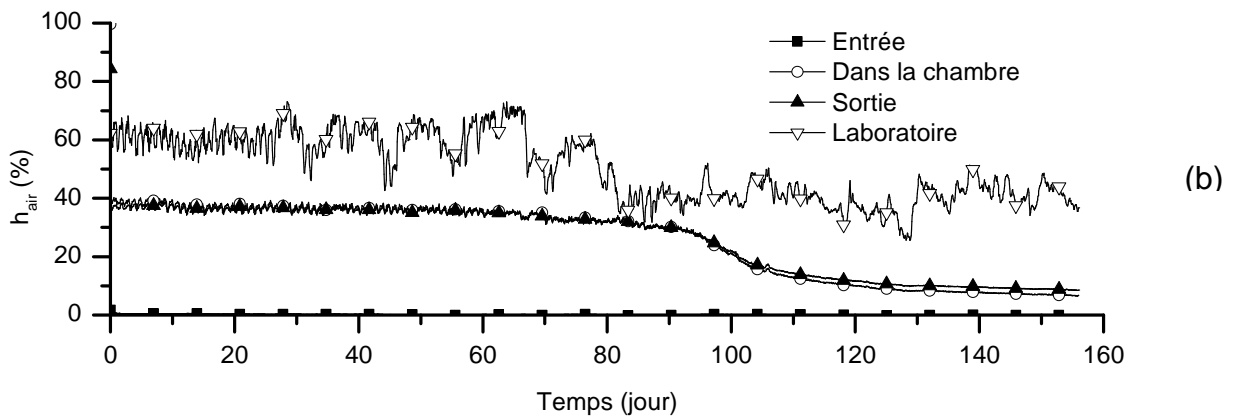
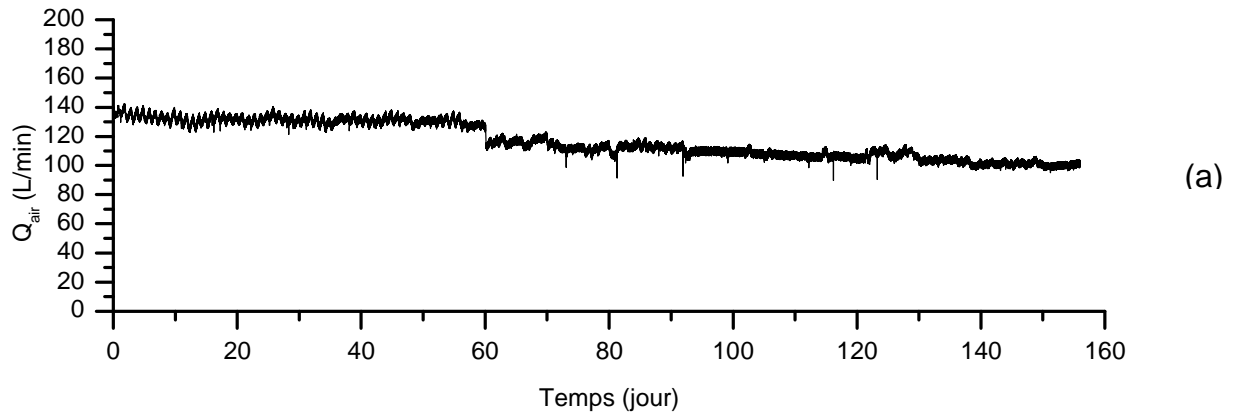
On rappelle que le séchage dans la chambre environnementale est provoqué par le vent chaud. La vitesse du vent et la température de l'air sont contrôlées comme décrit dans la section 2.3. L'humidité relative de l'air chaud est toujours inférieure à 5 %. Deux essais d'évaporation sont réalisés. Le premier séchage s'est arrêté après environ 156 jours. Pour le deuxième séchage, il est stoppé au bout de 140 jours. Une couche d'eau d'environ 3 cm est présente à la surface du sol au début de ces deux essais.

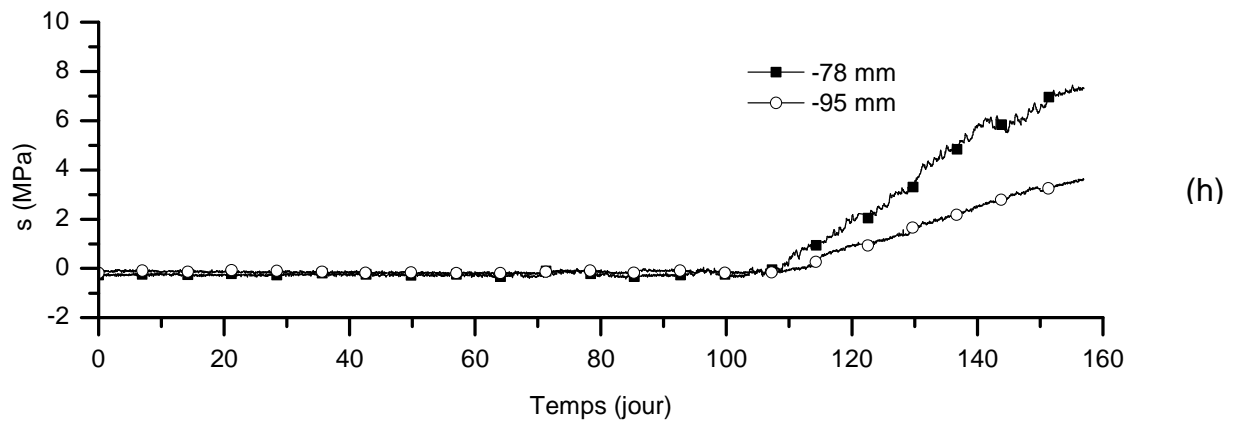
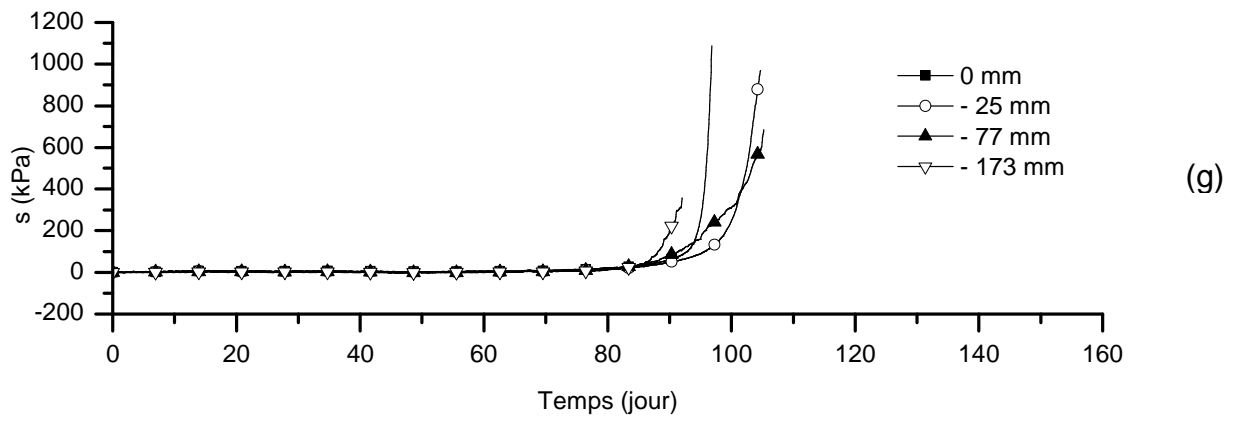
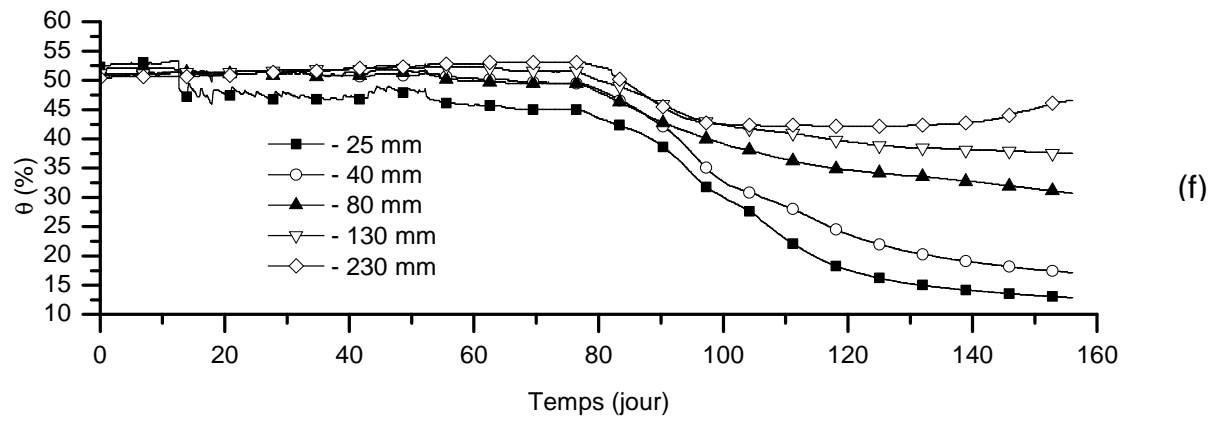
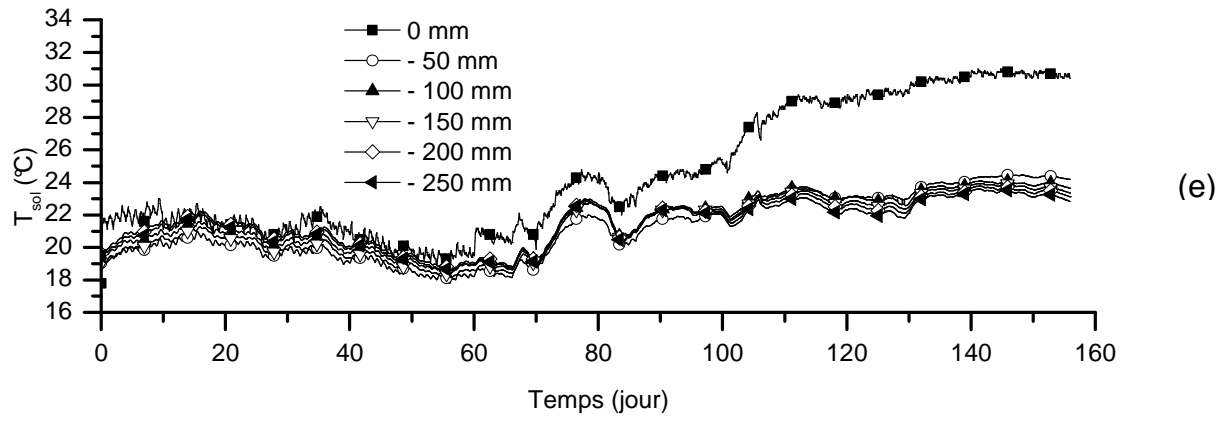
Les résultats sont présentés séparément par séchage. On présente d'abord la variation de débit d'air puis l'évolution de tous les paramètres de l'air et du sol dans la chambre environnementale au cours du temps : l'humidité relative et la température de l'air, la température, la teneur en eau volumique et la succion mesurée par trois types de capteurs pour le sol. Le profil de température identifié à partir des mesures de température de l'air et du sol ainsi que le profil de teneur en eau volumique identifié à partir des mesures de teneur en eau du sol dans la chambre environnementale sont également présentés.

3.2.1 Evolution des paramètres au cours du séchage 1

Le premier séchage a duré 156 jours en maintenant trois niveaux d'eau constants dans le réservoir : 52 jours (période 1 : de $t = 0$ à $t = 52$ jours) avec un niveau d'eau au-dessus de la surface, 12 jours (période 2 : de $t = 52$ à $t = 64$ jours) avec un niveau d'eau au milieu de la colonne de sol, 92 jours (période 3 : de $t = 64$ à $t = 156$ jours) avec un niveau d'eau au-dessus du fond du massif de sol. Cette procédure a pour but d'étudier la deuxième et la troisième phase du processus d'évaporation. Le débit du vent est contrôlé à 130 L/min pendant les 60 premiers jours et 110 L/min pendant les 96 jours suivants. La température est contrôlée à 200°C au niveau du tuyau chauffant. Cette condition se traduit par une température moyenne de 60°C relevée au niveau de la boîte de mesure à l'entrée de la chambre environnementale (Figure 5.7c). En fait, comme la figure l'indique, cette température varie entre 58 à 68°C . On note que la température ambiante varie entre 18 et 21°C et elle est plus basse que les

températures relevées dans la chambre et à la sortie de la chambre environnementale. En plus, la température ambiante conditionne l'allure des courbes d'évolution des températures à l'entrée, dans la chambre et à la sortie. La Figure 5.7 présente l'ensemble des paramètres mesurés au cours du temps pour le séchage 1.





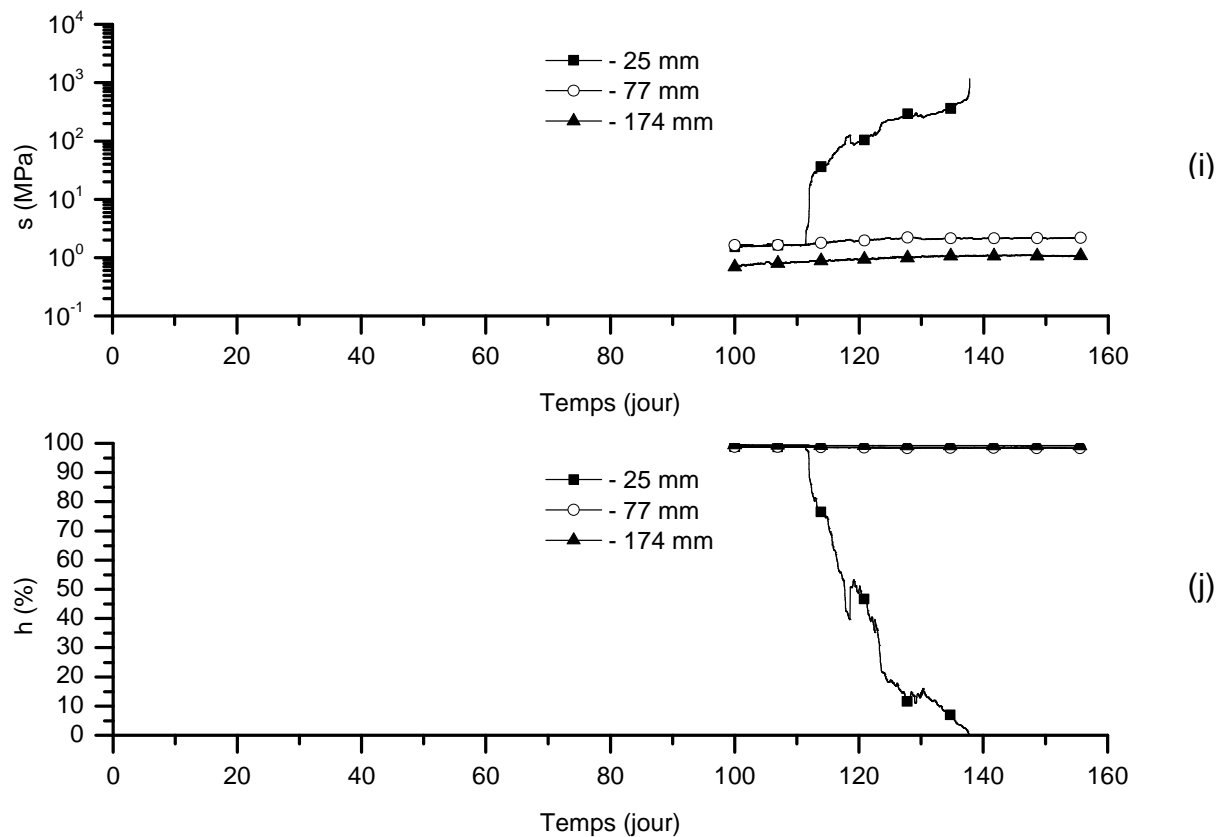


Figure 5.7 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour le séchage 1

On observe sur la Figure 5.7a que le débit d'air fluctue légèrement autour de 130 L/min pendant les 60 premiers jours et autour 110 L/min pendant les 96 jours suivants. On observe également une diminution progressive de débit lors de la période d'essai à cause du fonctionnement du système d'air comprimé du laboratoire.

L'humidité relative de l'air dans la chambre environnementale est relevée aux mêmes points que pour la mesure de température de l'air. Elle est présentée sur la Figure 5.7b. L'humidité relative de l'air à l'entrée est très faible ; elle est proche de 0 %. La valeur hors de la chambre ou au laboratoire varie de façon importante (35 - 60 %). On trouve que les valeurs de l'humidité relative dans la chambre et à la sortie sont proches et leurs variations sont aussi similaires. La diminution de l'humidité relative dans ces deux endroits, pendant le séchage, est très nette. En effet, la valeur initiale est de 40 % et la valeur finale est de 8 %. Un plateau à 40 % d'humidité relative est observé durant les 52 jours de la période 1 (de $t = 0$ à $t = 52$ jours) et les 12 jours de la période 2 (de $t = 52$ à $t = 64$ jours). Cette valeur de l'humidité relative diminue seulement pendant la période 3, à partir du 91^e jour. Cette phase de diminution continue semble se terminer à $t = 105$ jours.

Outre la température mesurée par les sondes T3111 présentée dans la Figure 5.7c, la température de l'air est aussi mesurée par des thermistances à différentes hauteurs de 50 mm à 425 mm au dessus du massif de sol (Figure 5.7d). On rappelle que ces thermistances sont installées sur la paroi à l'intérieur de la chambre et à mi-distance de l'entrée et de la sortie. Les valeurs de température sont différentes aux différentes hauteurs mais leurs variations sont similaires et similaires à la variation de la température dans la chambre (Figure 5.7c). En fait, comme la figure l'indique, ces valeurs de température varient entre 25 à 30 °C en fonction de la hauteur. On trouve que la température près de la surface du sol est toujours plus basse que

les températures au-dessus dans la chambre. Ces mesures seront utilisées pour identifier le profil de température dans la chambre environnementale qui est présenté dans les paragraphes suivants.

La Figure 5.7e présente l'évolution de la température mesurée dans le massif de sol et à la surface au cours du temps pour le séchage 1. A l'exception de la mesure à la surface du sol, la température dans le massif de sol est en général assez homogène. Quant à la température à la surface du sol, elle est plus haute que celles mesurées dans le massif. En plus, les variations de température dans le massif de sol (y compris à la surface du sol) suivent une même allure d'évolution que les variations de la température ambiante. On observe également une tendance à l'augmentation plus nette pour la température à la surface du sol par rapport aux températures relevées dans l'air, dans la chambre et à la sortie. En effet, on enregistre une augmentation de 20 à 30°C de cette valeur de la température et elle commence à s'écarter de la température dans le massif seulement dans la période 3.

L'évolution de la teneur en eau volumique dans le sol à différentes profondeurs est présentée sur la Figure 5.7f. Dans la période 1 (de $t = 0$ à $t = 52$ jours), on observe une stabilisation de la teneur en eau volumique à tous les niveaux à une valeur d'environ 51 % sauf le niveau le plus proche de la surface (-25 mm) qui présente une chute de 52 % à 48 % à $t = 12$ jours et se stabilise ensuite à cette valeur. Cette diminution de la teneur en eau près de la surface correspond à la disparition de la couche d'eau à la surface de sol après 12 jours d'évaporation. Dans la période 2 (de $t = 52$ à $t = 64$ jours), quand le niveau d'eau dans le réservoir s'est abaissé au niveau le plus bas, on observe une légère diminution pour la teneur en eau aux trois niveaux près de la surface (- 25 mm, - 40 mm et - 80 mm), suivie par la stabilisation après quelques jours. La teneur en eau aux deux autres niveaux plus profonds augmente légèrement à cause du gonflement du sol qui continue encore jusqu'à la fin de la période 2. Dans la période 3 (de $t = 64$ à $t = 156$ jours) quand le niveau d'eau dans le réservoir s'est abaissé la deuxième fois, on observe une stabilisation de la teneur en eau à tous les niveaux pendant 13 jours ($t = 77$ jours) avant le commencement d'une forte diminution de la teneur en eau à tous les niveaux. Plus le niveau est proche de la surface, plus le temps de diminution de la teneur en eau est long. On note que la diminution de la teneur en eau commence en même temps sur toute la profondeur de sol mais plus le niveau est proche du fond, plus la teneur en eau se stabilise tôt.

Les Figures 5.7g, h et i montrent des variations de succion mesurées par trois types de capteur : tensiomètre (Figure 5.7g), psychromètre (Figure 5.7h) et T3111 (Figure 5.7i). Il faut noter que le capteur T3111 ne donne pas directement la mesure de succion du sol mais son humidité relative. Les valeurs de succion présentées dans la Figure 5.7i sont converties à partir de résultats de l'humidité relative mesurée (Figure 5.7j) via l'équation de Kelvin. Dans la période 1 (de $t = 0$ à $t = 52$ jours) et la période 2 (de $t = 52$ à $t = 64$ jours), les mesures de succion par les tensiomètres et les psychromètres montrent que le massif de sol est encore saturé ou quasi saturé. On note que les capteurs T3111, installés sur les parois des deux côtés de la chambre pour mesurer l'humidité relative de sol, sont enlevés pendant la période où le sol est encore saturé pour éviter des dommages causés par une trop forte humidité. Dans la période 3 (de $t = 64$ à $t = 156$ jours), on observe une augmentation importante de la succion mesurée par les tensiomètres qui commence pour de $t = 77$ jours (Figure 5.7g), ce qui correspond au moment où les teneurs en eau commencent à diminuer (Figure 5.7f). Plus le niveau de sol est près de la surface, plus la vitesse d'augmentation de succion est importante, sauf pour la mesure du tensiomètre au niveau -173 mm qui cavite malheureusement très tôt à 357 kPa (vers $t = 92$ jours). Les trois autres tensiomètres ont cavité à 1090 kPa vers $t = 97$ jours, 970 kPa vers $t = 104$ jours et 690 kPa vers $t = 105$ jours, respectivement pour les

niveaux 0 mm, - 25 mm et - 77 mm. Pour les mesures des psychromètres, on trouve que leur réponse commence à $t = 110$ jours. Cette réponse se présente quelques jours plus tard que celle des tensiomètres, ce qui est concordant avec une étendue de mesure plus importante, jusqu'à 8000 kPa pour les psychromètres. Il faut noter que, malgré les 5 psychromètres installés, le résultat n'est disponible que pour deux d'entre eux, aux niveaux -78 mm et -95 mm à cause d'un dysfonctionnement des trois autres capteurs. En outre, on trouve aussi une tendance similaire pour les réponses des tensiomètres : plus le niveau de sol est près de la surface, plus la vitesse d'augmentation de succion est importante. A la fin du séchage 1, la succion du sol est de 7300 kPa au niveau -78 mm et 3600 kPa au niveau -95 mm (Figure 5.7h). Pour le résultat de succion, convertie à partir de l'humidité relative mesurée par des capteurs T3111 présenté dans la Figure 5.7i, seul le capteur à -25 mm répond parmi les trois capteurs utilisés. Cette réponse commence à $t = 111$ jours avec une mesure de 7000 kPa et se termine à $t = 138$ jours avec une mesure de 117500 kPa. On note que le résultat de succion convertie dans la gamme inférieure à 7000 kPa n'est pas précis (Ta 2009).

Les résultats de succion dans les Figures 5.7g, h et i sont repris et triés pour obtenir une combinaison complète de résultats de succion aux différentes profondeurs dans la chambre environnementale. Cette combinaison de succion est présentée dans la Figure 5.8. Seules les valeurs supérieures à 7000 kPa mesurées par les capteurs T3111, à 50 kPa mesurées par les capteurs psychromètres (PS), à 1 kPa mesurées par les capteurs tensiomètres (TS) sont reprises en raison de leur faible précision en dessous de ces limites respectives. On trouve une bonne concordance entre les résultats de succion triés obtenus à partir des mesures des trois types de capteurs différents dans la Figure 5.8.

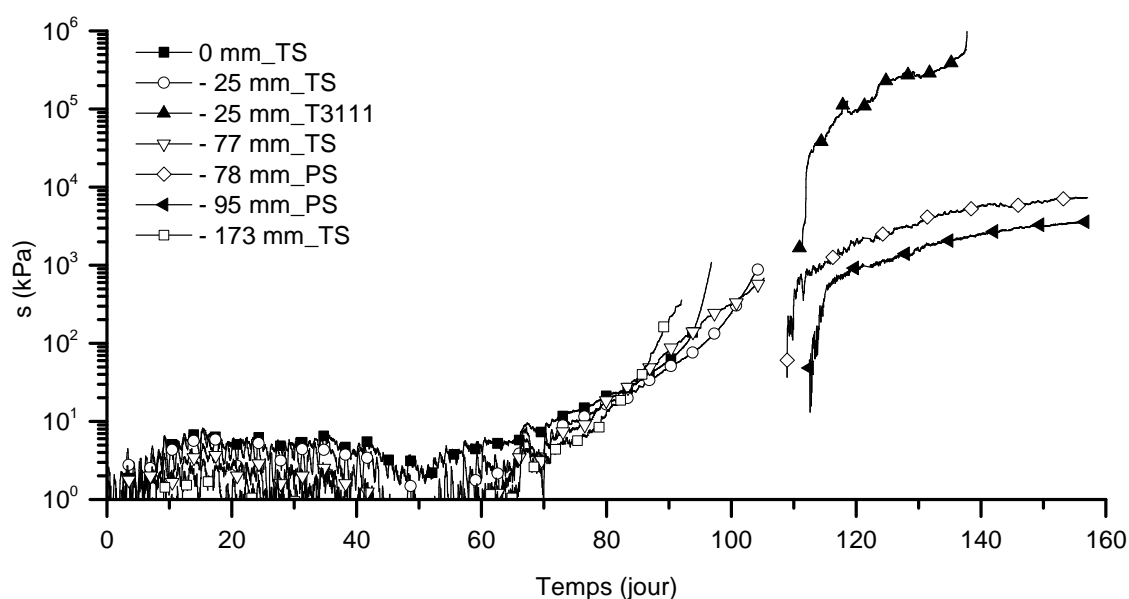


Figure 5.8 : Variation de succion mesurée par trois types de capteur au cours du temps pour le séchage 1

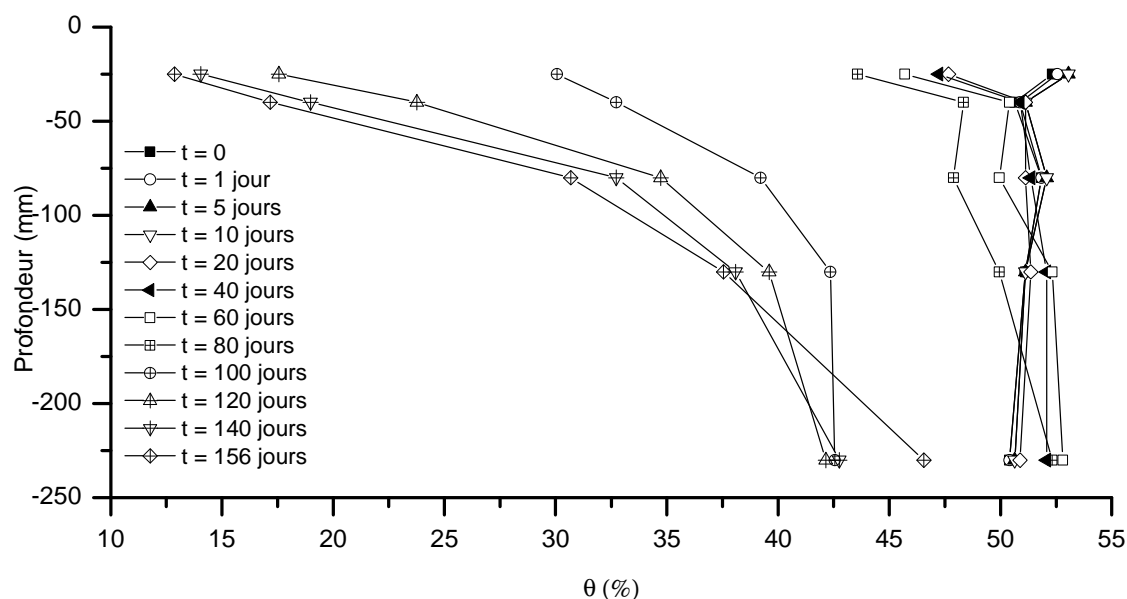


Figure 5.9 : Profils de teneur en eau dans la chambre environnementale pour le séchage 1

Les données de teneur en eau volumique (Figure 5.7f) sont reprises pour établir les profils de variations de teneur en eau dans la chambre environnementale (Figure 5.9). Dans la zone proche de la surface du sol, on observe un gradient de teneur en eau vers la surface. La teneur en eau près de la surface diminue de 52 % à 12 % entre le début et la fin du séchage. Plus le niveau est profond, moins la teneur en eau diminue. Au niveau du fond de la chambre environnementale, la teneur en eau diminue de 51 % à 42 %.

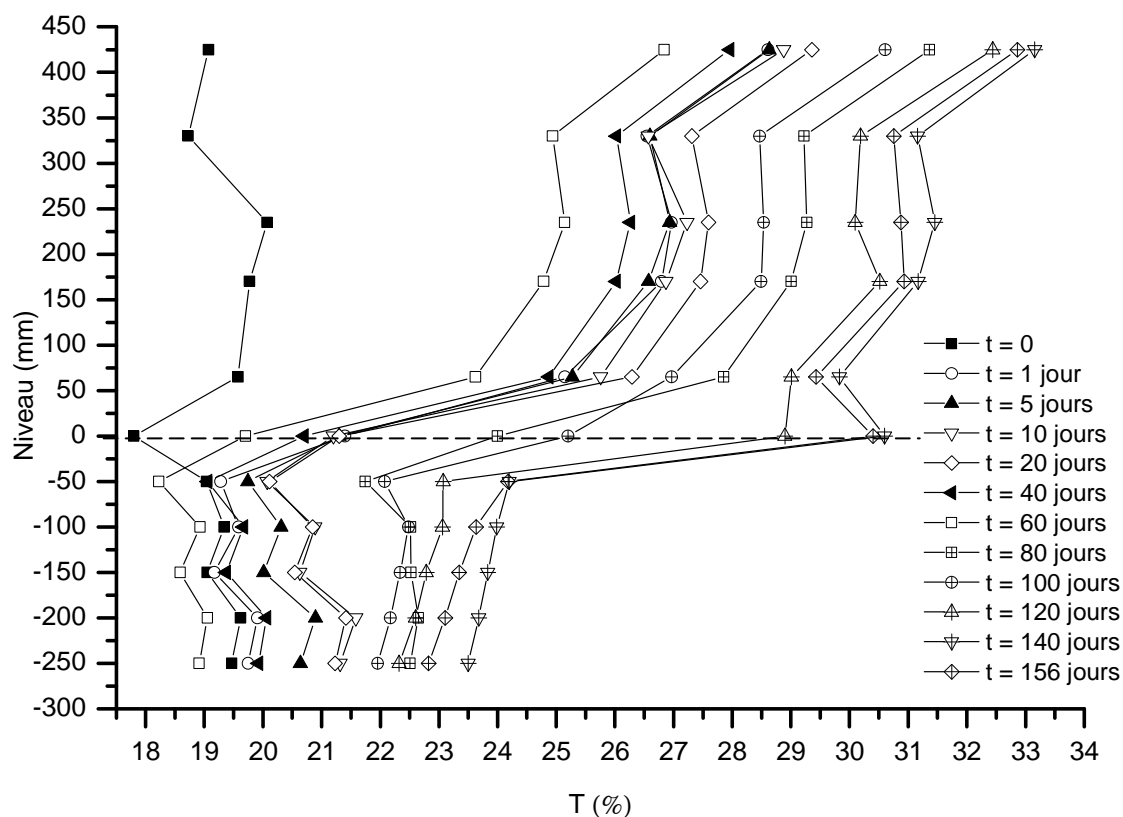


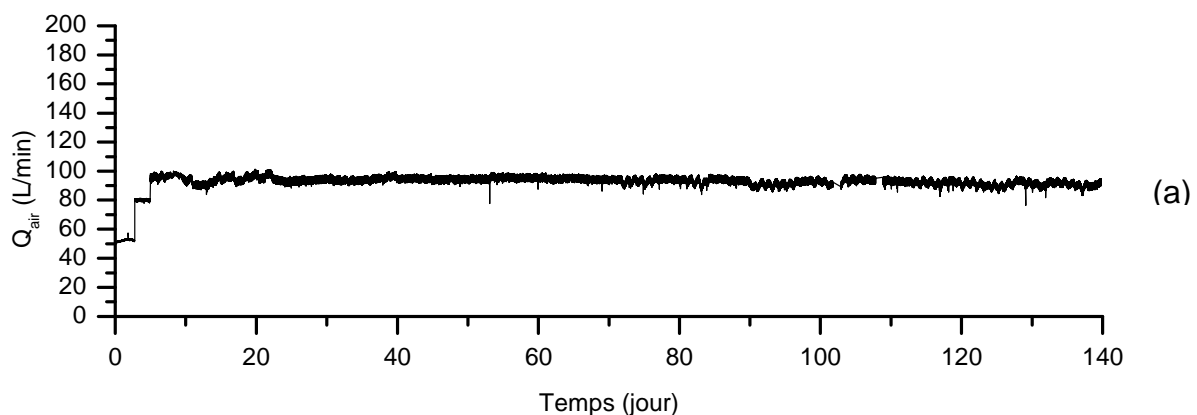
Figure 5.10 : Profils de température dans la chambre environnementale pour le séchage 1

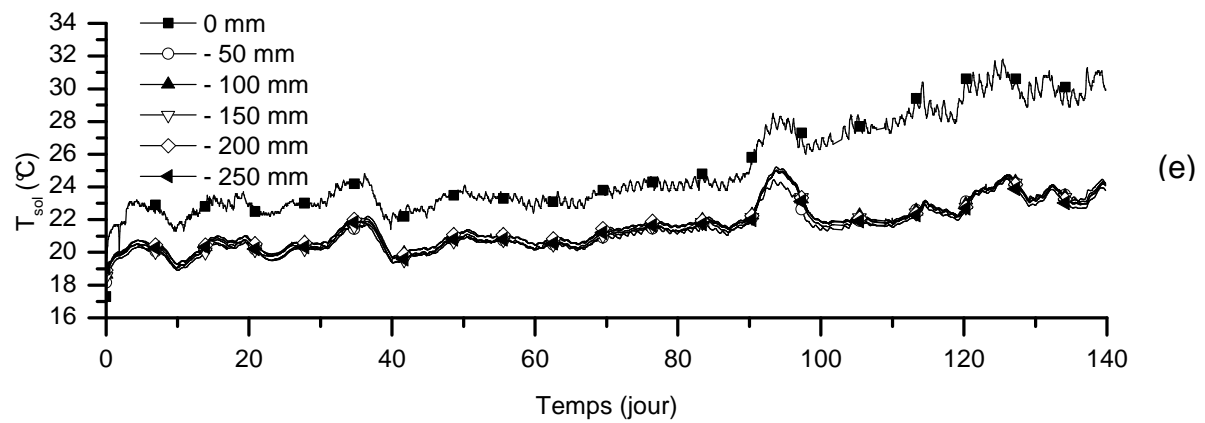
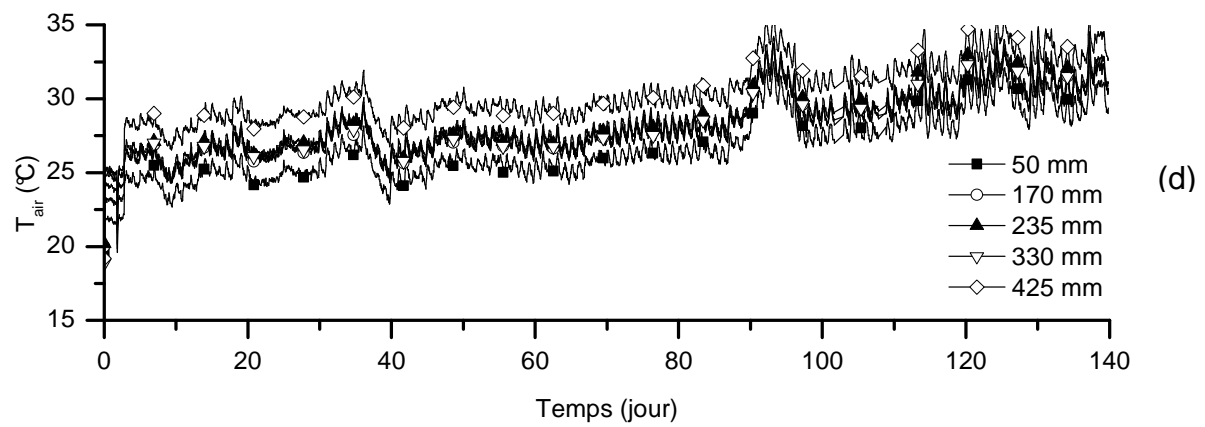
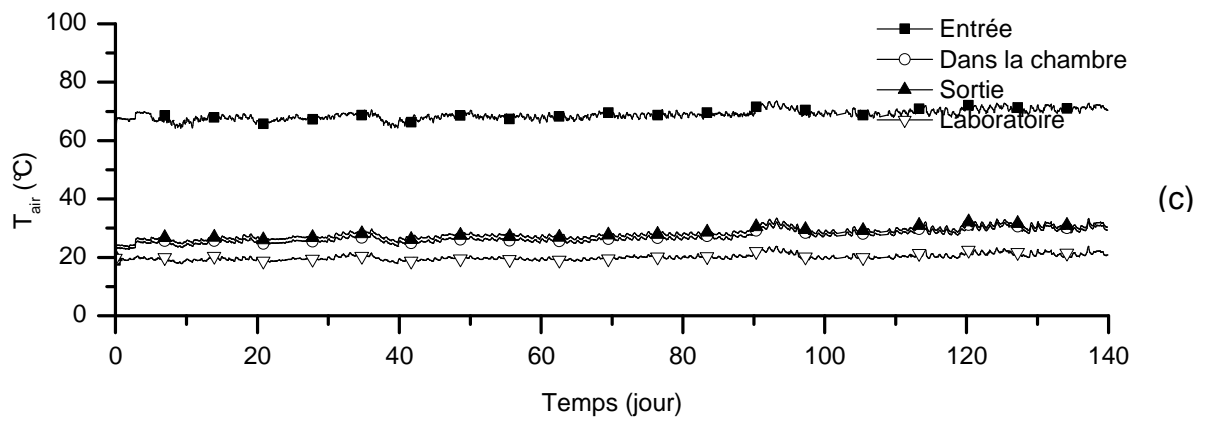
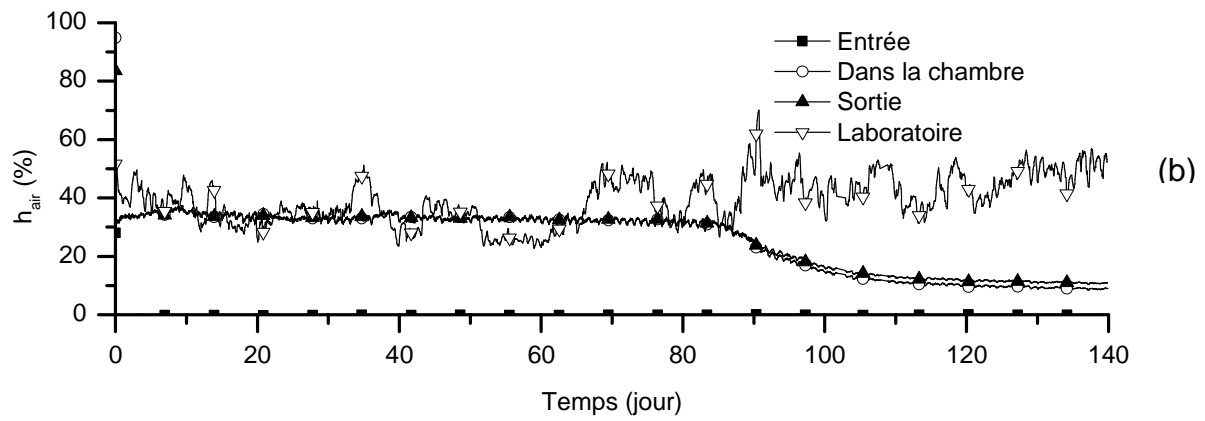
Afin de mieux apprécier la variation de température, les données de température sur les Figures 5.7d et e sont reprises pour établir les profils de température (Figure 5.10). Dans la zone proche de la surface du sol, on observe généralement un gradient net de température, sauf pour le profil au temps $t = 0$ et les profils des derniers jours. En fait, au début du séchage, à $t = 0$, la température à la surface du sol est plus basse que celle du sol et de l'air. Après le démarrage du séchage, on observe une augmentation de température à la surface du sol qui est toujours plus élevée que celle dans le sol.

3.2.2 Evolution des paramètres au cours du séchage 2

Pour étudier l'effet d'un cycle humidification-séchage sur le comportement du sol traité à la chaux, à l'échelle de la chambre environnementale, après le premier séchage, le massif de sol est resaturé comme présenté dans la partie 3.1. Il est ensuite séché une deuxième fois sous des conditions similaires à celles du premier séchage. Tous les résultats sur la variation des paramètres mesurés au cours du deuxième séchage sont présentés dans cette partie.

Le deuxième séchage a duré 140 jours en maintenant trois niveaux d'eau constants dans le réservoir comme pour le premier séchage : 28 jours (période 1 : de $t = 0$ à $t = 28$ jours) avec un niveau d'eau au-dessus de la surface, 10 jours (période 2 : de $t = 28$ à $t = 38$ jours) avec un niveau d'eau au milieu de la colonne de sol, 102 jours (période 3 : de $t = 38$ à $t = 140$ jours) avec un niveau d'eau au-dessus du fond de la colonne de sol. Cette procédure a pour but aussi d'étudier la deuxième et la troisième phase du processus d'évaporation dans le séchage 2. Le débit du vent est contrôlé à 50 L/min pendant les 3 premiers jours (de $t = 0$ jours à $t = 3$ jours), puis à 80 L/min pendant les 2 jours suivants (de $t = 3$ jours à $t = 5$ jours). Enfin, ce débit est maintenu à 95 L/min (de $t = 5$ jours à $t = 140$ jours) jusqu'à la fin du séchage 2. Il faut noter que le changement de débit d'air est effectué quand il reste encore une couche d'eau sur la surface du sol et cette procédure a pour but d'étudier l'évaporation maximale dans la chambre environnementale. Dans ce séchage, la température est aussi contrôlée à 200°C au niveau du tuyau chauffant. Cette condition d'imposition se traduit par une température moyenne de 68°C relevée au niveau de la boîte de mesure à l'entrée de la chambre environnementale (Figure 5.11c). En fait, comme la figure l'indique, cette température varie entre 67 à 70°C. On trouve que la température contrôlée dans le tuyau chauffant dans les deux séchages est la même (200 °C) mais la température imposée à l'entrée dans le séchage 2 est plus élevée que celle dans le séchage 1. Ceci peut être expliqué par le débit d'air moins important circulant dans le tuyau chauffant lors du séchage 2. En outre, on note aussi que la température ambiante varie entre 18 et 22°C et elle est plus basse que les températures relevées dans la chambre et à la sortie de la chambre environnementale. La température ambiante conditionne l'allure des courbes d'évolution des températures à l'entrée, dans la chambre et à la sortie.





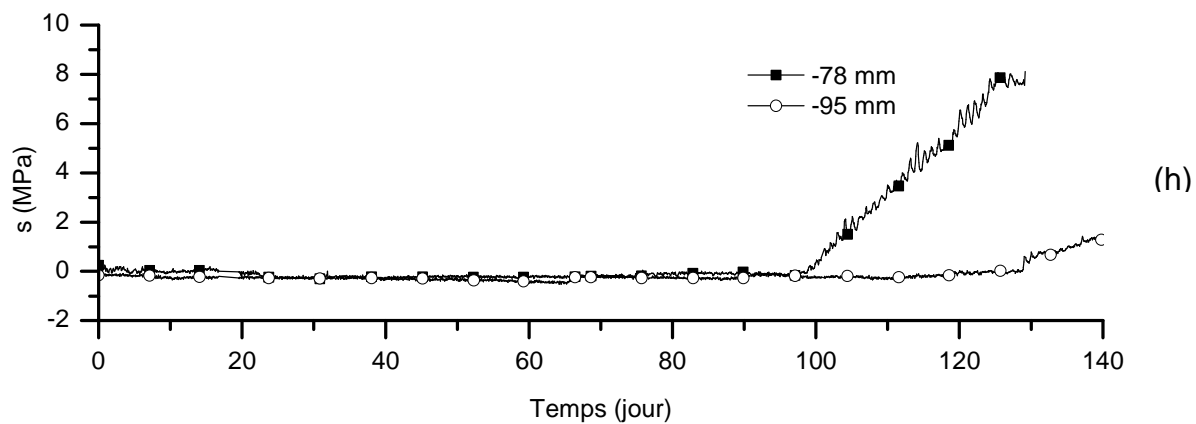
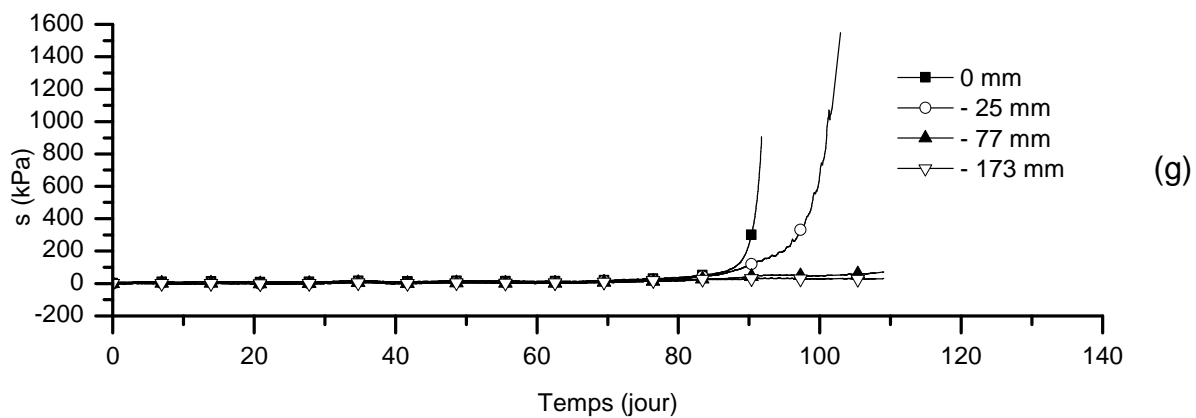
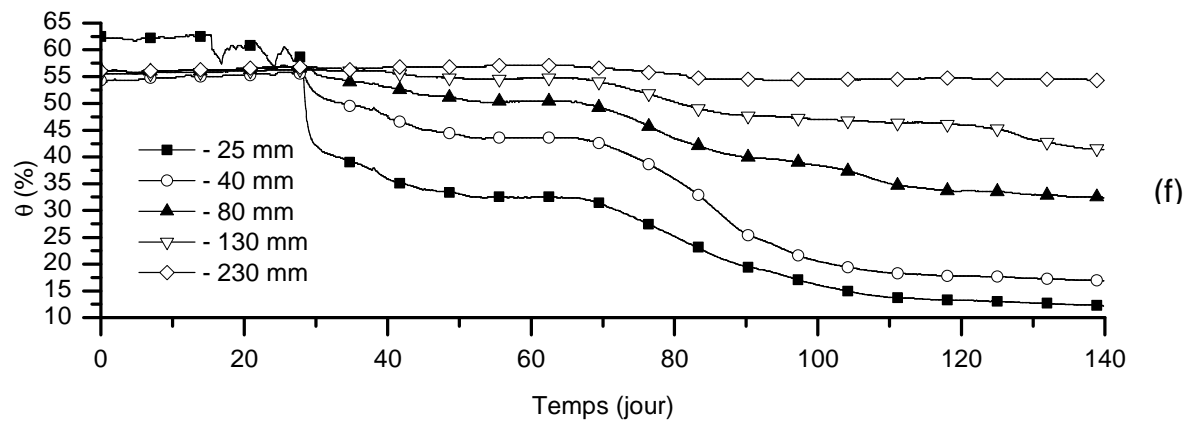


Figure 5.11 : Evolution de différents paramètres au cours du temps pour le séchage 2

La Figure 5.11 présente l'ensemble des paramètres mesurés au cours du temps pour le séchage 2. Par rapport à la présentation des résultats du séchage 1, dans ce séchage 2, l'humidité relative et la succion convertie du sol, mesurées par les capteurs T3111, ne sont pas disponibles à cause d'un dysfonctionnement de capteur.

On observe sur la Figure 5.11a que le débit d'air lors de ce séchage 2 est mieux contrôlé que lors du séchage 1. Il est maintenu à un débit moins important que celui du séchage 1 : 95 L/min pendant la période de $t = 5$ jours à $t = 140$ jours.

L'humidité relative et la température de l'air dans la chambre environnementale présentées dans les Figure 5.11b et c sont relevées aux mêmes points. Comme dans le séchage précédent,

l'humidité relative de l'air à l'entrée est très faible et proche de 0 %. La valeur hors de la chambre ou au laboratoire varie de façon importante (25 - 70 %). On trouve aussi que les valeurs de l'humidité relative dans la chambre et à la sortie sont proches et leurs variations sont similaires. Dans ce deuxième séchage, la diminution de l'humidité relative dans ces deux endroits est aussi trouvée seulement dans la période 3 du séchage ou quand le niveau d'eau dans le réservoir s'approche du fond du massif de sol. En effet, la valeur initiale est de 34 % et la valeur finale est de 10 %. Le plateau à 34 % d'humidité relative est observé durant 28 jours lors de la période 1 (de $t = 0$ à $t = 28$ jours) et 10 jours lors de la période 2 (de $t = 28$ à $t = 38$ jours). On note que ce plateau de l'humidité relative est plus bas que celui du séchage 1 qui est à 40 %. Ceci peut être lié au débit d'air moins important utilisé dans ce séchage. Cette valeur de l'humidité relative commence à diminuer 47 jours ($t = 85$ jours) après le début de la période 3. Cette phase de diminution continue semble se terminer à $t = 103$ jours.

La Figure 5.11d présente la température de l'air mesurée par des thermistances à différentes hauteurs de 50 mm à 425 mm au dessus du massif de sol lors du séchage 2. Comme dans le séchage 1, la température de l'air dans la chambre est différente aux différentes hauteurs. Ces valeurs varient entre 22 à 32 °C et leurs variations sont similaires entre elles et similaires à la variation de la température dans la chambre (Figure 5.11c). La température près de la surface du sol est toujours plus basse que les températures au-dessus dans la chambre.

La Figure 5.11e présente l'évolution de la température mesurée dans le massif de sol et à la surface au cours du temps pour le séchage 2. Comme pour le séchage 1, la température dans le massif de sol est assez homogène, sauf la température à la surface. Cette température est plus haute que les températures dans le massif. En plus, les variations de température dans le massif de sol (y compris à la surface du sol) présentent la même évolution que les variations de la température ambiante. On observe également une tendance à une augmentation plus nette pour la température à la surface du sol par rapport aux températures relevées dans l'air, dans la chambre et à la sortie. En effet, on enregistre aussi une augmentation de 20 à 30°C de cette valeur de la température et elle commence à s'écarter de la température dans le massif du sol seulement dans la période 3.

La Figure 5.11f présente l'évolution de la teneur en eau volumique dans le sol à différentes profondeurs lors du séchage 2. Comme dans le séchage 1, on observe une stabilisation de teneur en eau volumique dans la période 1 (de $t = 0$ à $t = 28$ jours), à tous les niveaux, à une valeur d'environ 56 % sauf pour le niveau le plus proche de la surface (-25 mm). La teneur en eau à ce niveau se stabilise à une valeur plus élevée que celle des niveaux plus bas (62 %) pendant 15 jours, puis diminue et fluctue autour de 59 %. On remarque que cette durée de 15 jours, où le sol à la surface reste encore saturé dans le séchage 2, est plus longue que lors du séchage 1. Ceci peut être lié au débit d'air moins important dans le séchage 2. Dans la période 2 (de $t = 28$ à $t = 38$ jours), quand le niveau d'eau dans le réservoir s'est abaissé au niveau le plus bas, on observe une diminution plus importante pour la teneur en eau aux trois niveaux près de la surface (- 25 mm, - 40 mm et - 80 mm) par rapport au séchage 1. Quand les valeurs de teneur en eau, à ces trois niveaux, se stabilisent, le niveau d'eau dans le réservoir est abaissé jusqu'à un niveau de 2 cm au-dessus du fond du massif de sol. Les valeurs de teneurs en eau à - 25 mm, - 40 mm, - 80 mm, - 130 mm et -230 mm, à la fin de cette période, sont de 37 %, 48 %, 53 %, 56 % et 56,5 % respectivement. Au début de la période 3 (de $t = 38$ à $t = 140$ jours), la teneur en eau à tous les niveaux diminue pendant 12 jours (de $t = 38$ jours à $t = 50$ jours), sauf la teneur en eau au niveau le plus profond qui reste encore constante. Une période de stabilisation de 18 jours (de $t = 50$ jours à $t = 68$ jours) de teneur en eau à tous les niveaux est observée avant une autre forte diminution de teneur en eau à tous les niveaux. Plus le niveau est proche de la surface, plus le temps de diminution de la teneur en eau est

long. Le phénomène de diminution de la teneur en eau qui commence en même temps sur toute la profondeur de sol est aussi observé dans ce séchage 2.

Les Figures 5.11g et h montrent des variations de succion mesurées par les deux types de capteur : tensiomètre (Figure 5.11g) et psychromètre (Figure 5.11h). Pour rappel, les mesures de l'humidité relative et la succion convertie pour les T3111 du sol, comme dans le séchage 1, ne sont pas disponibles à cause d'un dysfonctionnement de capteur. Dans la période 1 (de $t = 0$ à $t = 28$ jours) et la période 2 (de $t = 28$ à $t = 38$ jours), les mesures de succion par les tensiomètres et les psychromètres montrent que le massif de sol est encore saturé ou quasi saturé. Dans la période 3 (de $t = 38$ à $t = 140$ jours), on observe aussi une augmentation de succion mesurée par les tensiomètres qui commence pour $t = 68$ jours, correspondant au moment où les mesures de teneur en eau commencent à diminuer (Figure 5.11f). On note que ce moment de diminution de succion ne peut pas être observé à l'échelle de la Figure 5.11g mais il est bien observé dans la Figure 5.12. Plus le niveau de sol est près de la surface, plus la vitesse d'augmentation de succion est importante. Le tensiomètre à la surface a cavité en premier pour 900 kPa vers $t = 92$ jours, ensuite le tensiomètre au niveau -25 mm pour 1500 kPa vers $t = 103$ jours. Les deux autres tensiomètres plus profonds n'ont pas encore cavité jusqu'à $t = 109$ jours. Par la suite, les mesures de ces deux tensiomètres ne sont pas disponibles. Pour les mesures des psychromètres, on trouve que leur réponse commence à $t = 100$ jours pour le capteur au niveau -78 mm et à $t = 130$ jours pour le capteur au niveau -95 mm. Cette réponse arrive quelques jours plus tard par rapport à celle des tensiomètres, ce qui est concordant avec une étendue de mesure plus importante jusqu'à 8000 kPa pour les psychromètres. Comme dans le séchage 1, on trouve aussi une tendance similaire pour les réponses des tensiomètres : plus le niveau de sol est près de la surface, plus la vitesse d'augmentation de succion est importante. A la fin du séchage 2, la succion du sol est de 8000 kPa au niveau de -78 mm et de 1300 kPa au niveau de -95 mm (Figure 5.11h).

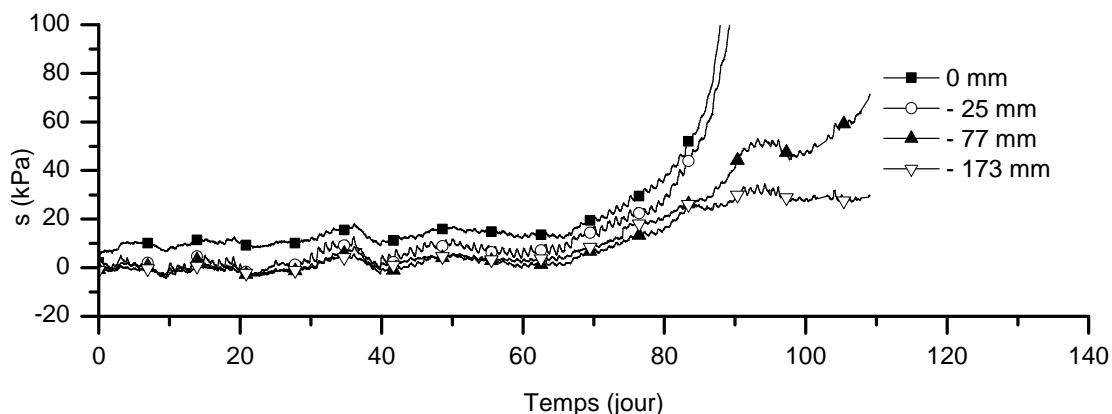


Figure 5.12 : Variation de succion mesurée par tensiomètre au cours du temps pour le séchage 2

Comme pour la présentation précédente du séchage 1, les résultats de succion dans les Figures 5.11g et h sont aussi repris et triés pour établir une combinaison complète de résultats de succion, aux différentes profondeurs, dans la chambre environnementale. Cette combinaison de succions est présentée dans la Figure 5.13. Seules les valeurs supérieures à 7000 kPa mesurées par les capteurs T3111, à 50 kPa mesurées par les capteurs psychromètres (PS), à 1 kPa mesurées par les capteurs tensiomètres (TS) sont reprises en raison de leur faible précision en dessous de ces limites respectives. On trouve une bonne concordance entre les résultats de succion triés obtenus à partir des mesures des deux types de capteurs dans la Figure 5.13.

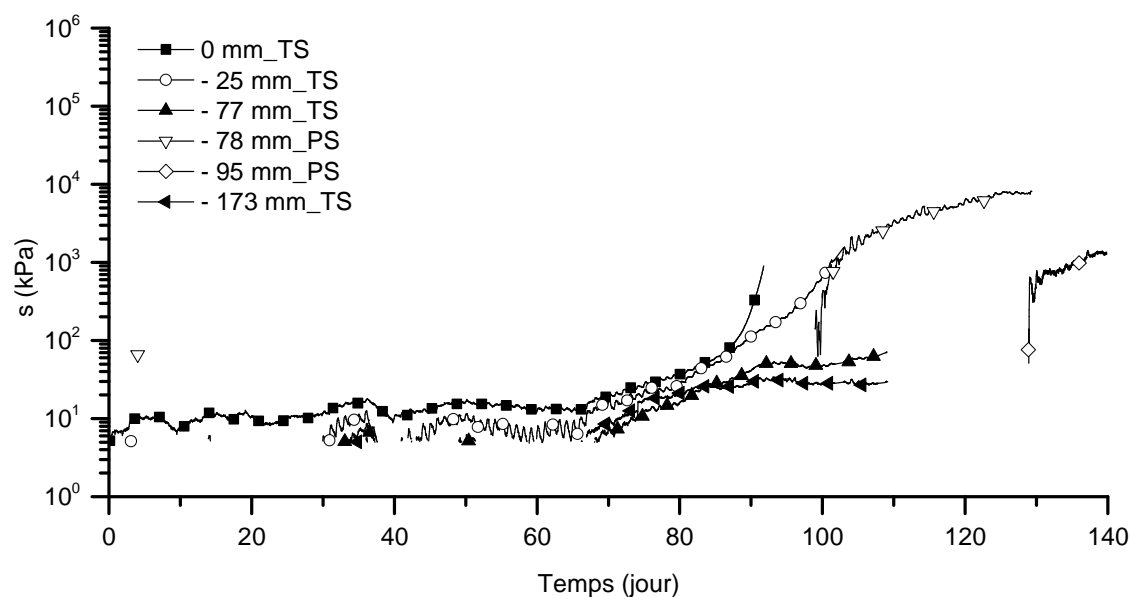


Figure 5.13 : Variation de succion mesurée par deux types de capteur au cours du temps pour le séchage 2

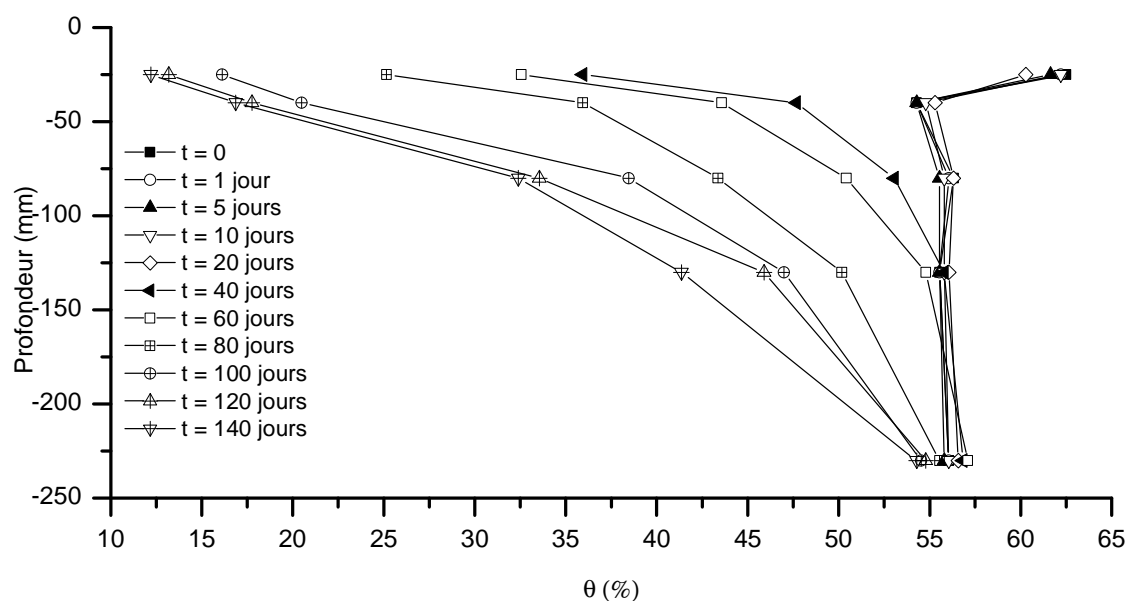


Figure 5.14 : Profil de teneur en eau dans la chambre environnementale pour le séchage 2

Les données de teneur en eau volumique (Figure 5.11f) sont reprises pour établir les profils de teneur en eau (Figure 5.14). Dans la zone proche de la surface du sol, on observe un gradient de teneur en eau depuis la surface. La teneur en eau, près de la surface, diminue de 62 % au début à 12 % à la fin de séchage. Plus le niveau est profond, moins la teneur en eau diminue. La teneur en eau au niveau près du fond diminue de 56 % à 54 %. On trouve que l'étendue de variation de teneur en eau, au fond, dans le séchage 2 n'est pas aussi large que celle correspondant au séchage 1.

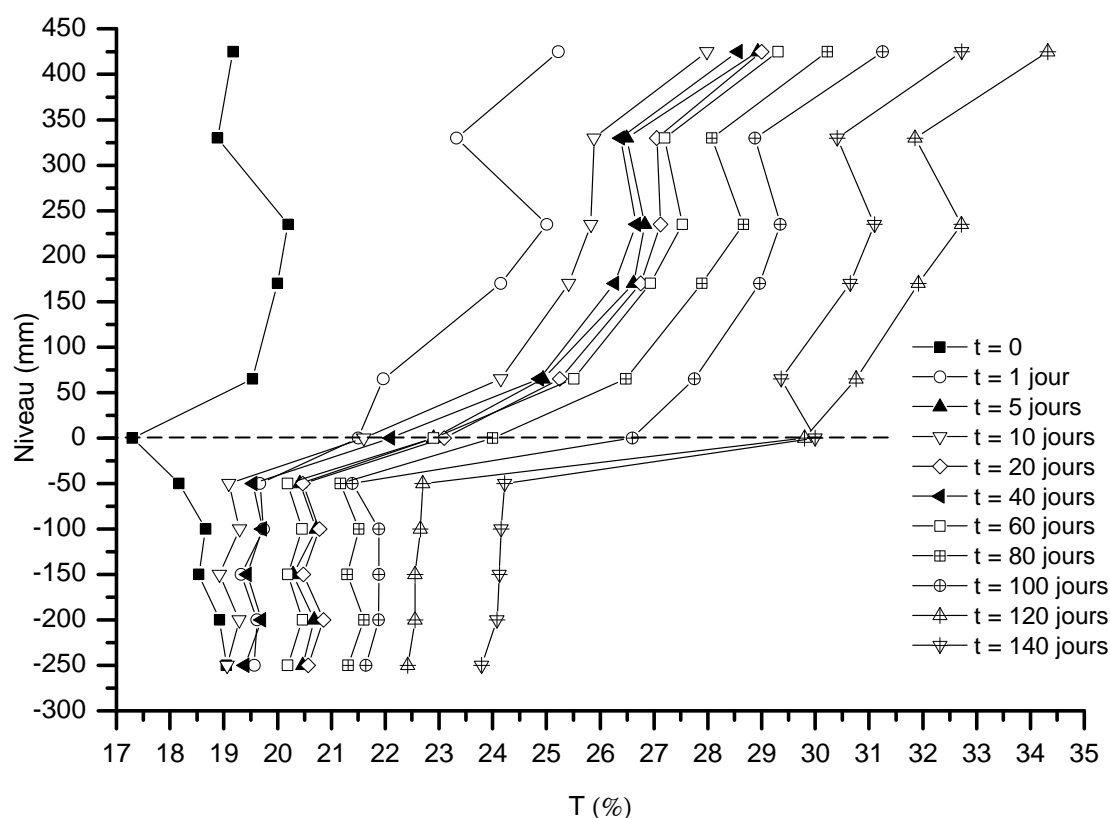


Figure 5.15 : Profil de température dans la chambre environnementale pour le séchage 2

Les données de température (Figure 5.11d et Figure 5.11e) sont reprises pour établir les profils de température (Figure 5.15). Dans la zone proche de la surface du sol, on observe généralement un gradient de température, sauf pour le profil correspondant au moment initial $t = 0$. En fait, au début de séchage, à $t = 0$, la température à la surface du sol est plus basse que celle du sol et de l'air. Après le démarrage du séchage, comme dans le séchage 1, on observe une augmentation de température à la surface du sol qui est toujours plus élevée que celle dans le sol.

3.2.3 Exploitation des résultats

Dans cette partie, les profils de la succion et de la teneur en eau volumique, établis pour le séchage 1 et séchage 2, sont exploités pour déterminer la courbe de rétention d'eau et la relation entre la conductivité hydraulique et la succion du sol (argile d'Héricourt) traité à la chaux.

3.2.3.1 Courbe de rétention d'eau

La propriété de rétention d'eau est un paramètre important dans la description du comportement hydromécanique d'un sol. Les données de succion et de teneur en eau enregistrées simultanément au cours du premier séchage et du deuxième séchage sont utilisées pour sa détermination. Les données sont d'abord triées pour établir des profils journaliers de succion ainsi que des teneurs en eau comme décrit dans la partie précédente. Puisque la teneur en eau et la succion ne sont pas mesurées aux mêmes niveaux de la chambre environnementale, des interpolations et des extrapolations sont effectuées ensuite pour obtenir les valeurs de ces deux paramètres aux mêmes niveaux. Dans ce cas, les données de mesures

de teneur en eau sont utilisées pour extrapoler et interpoler, afin d'obtenir les valeurs de teneur en eau aux mêmes niveaux que les mesures de succion.

Les courbes de rétention d'eau obtenues pour le séchage 1 et pour le séchage 2 sont présentées (Figure 5.16 et Figure 5.17). On observe un effet de la profondeur sur les courbes de rétention d'eau correspondant à ces deux séchages. Autrement dit, chaque niveau de mesure a une courbe de rétention d'eau différente.

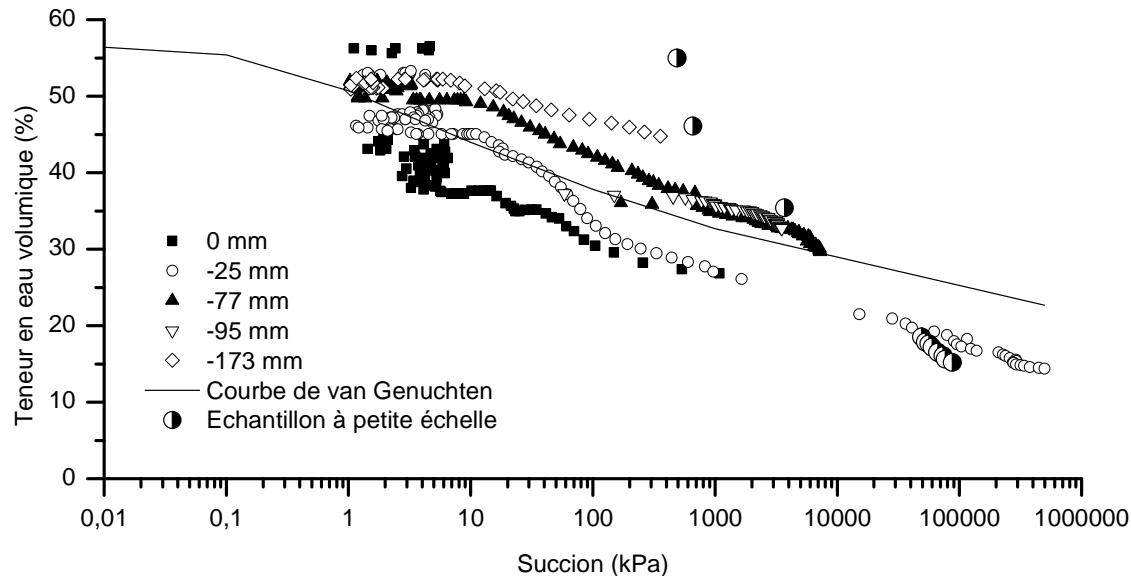


Figure 5.16 : Courbe de rétention d'eau correspondant au séchage 1

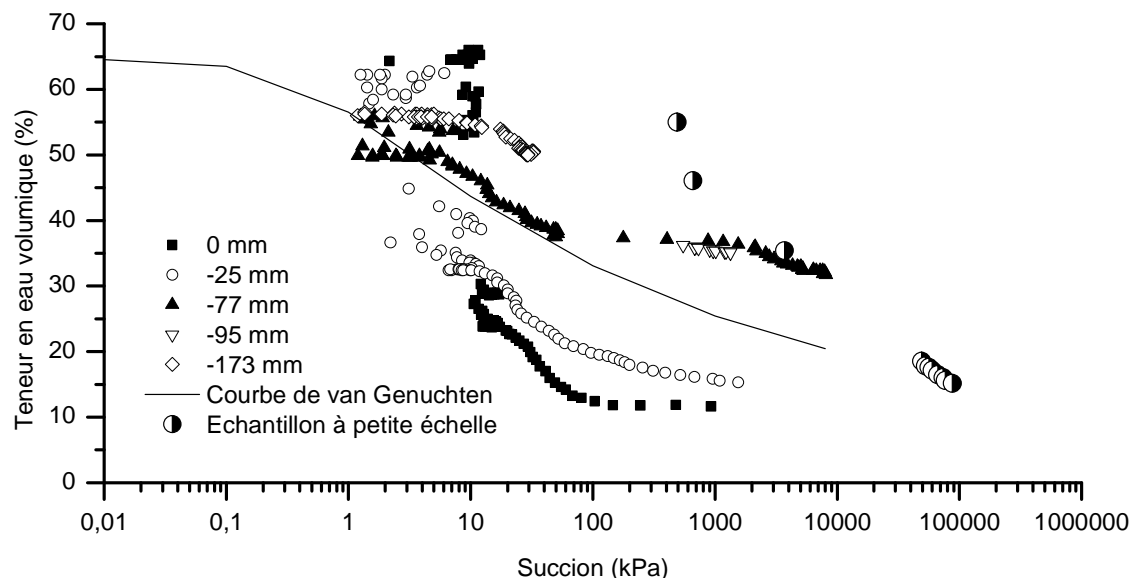


Figure 5.17 : Courbe de rétention d'eau correspondant au séchage 2

Les deux résultats sont comparés avec les résultats obtenus par l'essai de mesure de succion sur l'échantillon de sol traité à la chaux, à l'échelle de l'échantillon, dans le chapitre 1. Il faut noter que la teneur en eau massique de l'éprouvette, à petite échelle dans le chapitre 1, est convertie en teneur en eau volumique en considérant la masse volumique sèche compactée de $\rho_d = 1,4 \text{ Mg/cm}^3$. En plus, seules les valeurs de succion supérieures à 500 kPa obtenues par

la mesure de potentiel de l'eau dans l'échantillon de sol sont présentées dans la comparaison à cause de la faible précision de mesures par le potentiomètre en dessous de cette limite. Sur les deux Figures 5.16 et 5.17, on observe une bonne compatibilité des résultats obtenus par les essais d'évaporation dans la chambre environnementale avec l'essai de mesure de succion de l'éprouvette à petite échelle.

En outre, les données des deux courbes de rétention d'eau pour les deux séchages sont prises pour caler des paramètres de la formule [5.1] proposée par van Genuchten (1980) en utilisant la méthode des moindres carrées. Ces deux courbes de van Genuchten sont également présentées sur les deux Figures 5.16 et 5.17.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha s)^n\right]^m} \quad [5.1]$$

Avec θ : teneur en eau volumique

θ_s : teneur en eau volumique à l'état saturé

θ_r : teneur en eau volumique résiduelle

$\alpha, n, m = 1 - 1/n$: paramètres de modèle

On obtient les valeurs suivantes pour les deux courbes de van Genuchten :

- séchage 1 : $n = 1,078$; $m = 0,072$; $\alpha = 4,027$ avec $\theta_s = 56,52 \%$; $\theta_r = 6,5 \%$
- séchage 2 : $n = 1,147$; $m = 0,129$; $\alpha = 2,000$ avec $\theta_s = 64,6 \%$; $\theta_r = 6,5 \%$

3.2.3.2 Conductivité hydraulique

Les mesures simultanées de succion et de teneur en eau volumique peuvent être utilisées pour la détermination de la relation entre la conductivité hydraulique et la succion en utilisant la méthode des profils instantanés (Chiu et Shackelford 1998 ; Daniel 1982 ; Meerdink et al. 1996). On utilise les profils de succion pour déterminer les gradients hydrauliques aux temps t et $t + \Delta t$ (i_t et $i_{t+\Delta t}$ respectivement) ; on utilise les profils de teneur en eau pour déterminer le débit q à travers une position (hauteur) donnée. En considérant une section A et en appliquant la loi de Darcy généralisée, la perméabilité hydraulique est calculée par la formule suivante (Daniel 1982 ; Cui et al. 2008) :

$$k = -\frac{1}{A} \frac{q}{\frac{i_t + i_{t+\Delta t}}{2}} \quad [5.2]$$

Avec $i = \frac{ds}{dh}$ (cm H₂O/cm) : profil de succion

$$q = A \frac{\int_{x_i}^H \theta_{t+\Delta t} dx - \int_{x_i}^H \theta_t dx}{\Delta t} \quad (\text{m}^3/\text{jour}) : \text{profil journalier de teneur en eau } (\Delta t = 1 \text{ jour})$$

On note que les profils journaliers de succion ainsi que de teneur en eau utilisés pour déterminer la courbe de rétention d'eau sont repris pour obtenir la conductivité hydraulique du sol dans la chambre environnementale.

Les conductivités hydrauliques en fonction de la succion obtenues pour le séchage 1 et le séchage 2 sont présentées (Figure 5.18 et Figure 5.19). Comme pour les courbes de rétention d'eau, l'effet de la profondeur est observé sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion pour les deux séchages. Chaque niveau de mesure a une courbe de conductivité hydraulique différente.

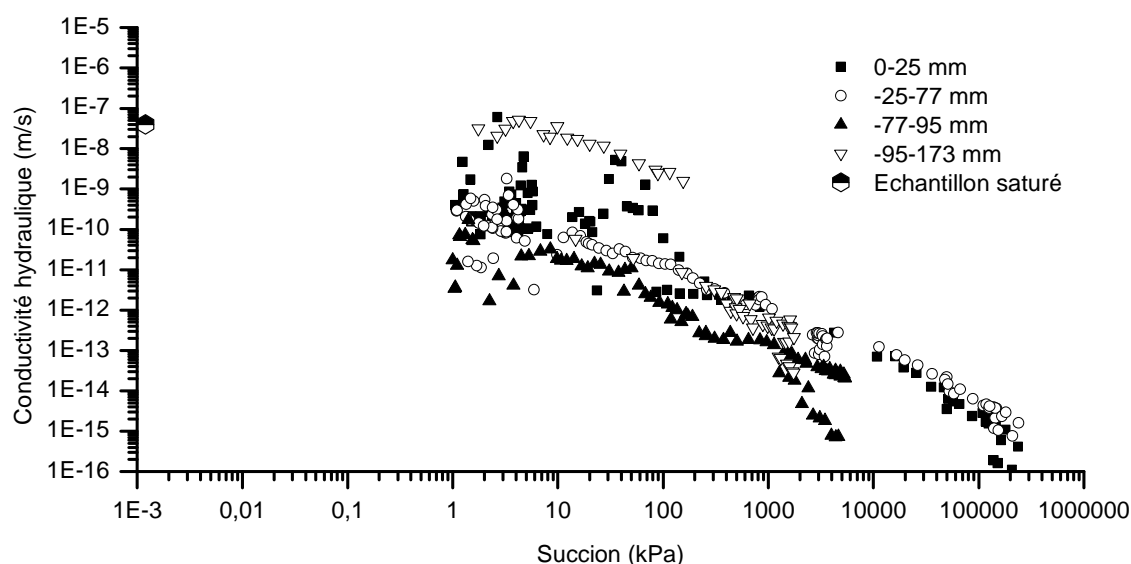


Figure 5.18 : Conductivité hydraulique en fonction de la succion, pour le séchage 1

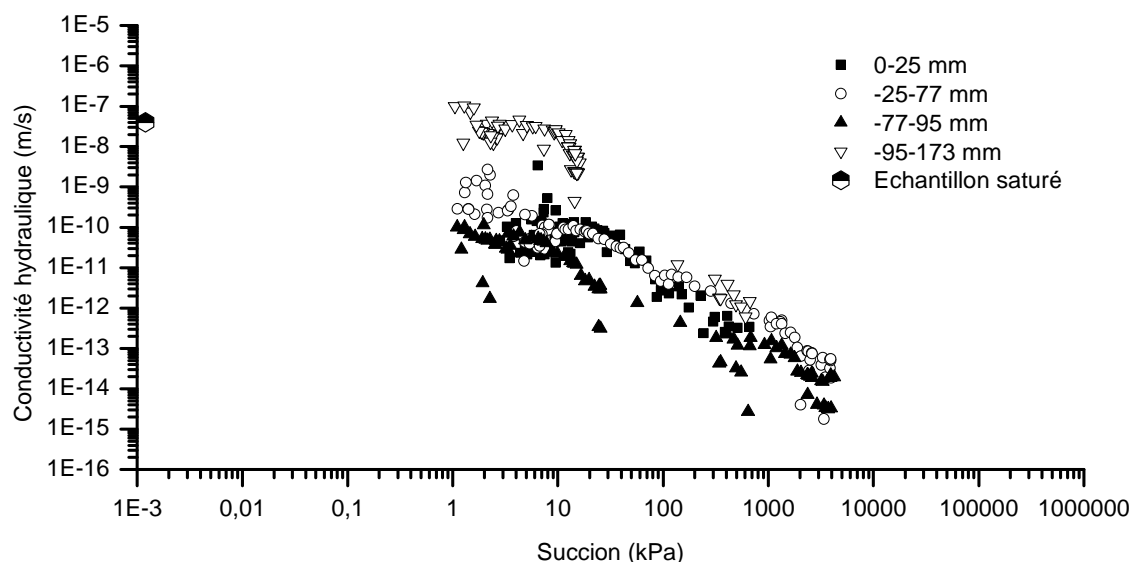


Figure 5.19 : Conductivité hydraulique en fonction de la succion, pour le séchage 2

En outre, un point relatif à la conductivité hydraulique à l'état saturé, du même sol traité à la chaux, mesurée à l'échelle de l'éprouvette, est également présenté sur les deux Figures 5.18 et 5.19. On trouve que ce point a un ordre de grandeur correspondant à la zone saturée de la courbe de conductivité hydraulique et est en concordance avec les résultats calculés. En effet,

la conductivité hydraulique du sol traité à la chaux varie de 10^{-7} m/s environ (pour le sol saturé) à 10^{-16} m/s (pour le sol sec) au cours de séchage.

On note que les résultats de la conductivité hydraulique en fonction de la succion et de la courbe de rétention d'eau sont aussi très utiles pour la validation de modèles numériques relatifs aux transferts hydriques dans le massif de sol (Wilson et al. 1994 ; Cui et al. 2005).

3.3. Discussions et comparaison avec les résultats relatifs au sol non-traité

3.3.1 Infiltration

Les phases d'infiltration sont réalisées avec les suivis de l'humidité relative, de la teneur en eau, de la succion, de la température à différentes positions dans le sol, et du gonflement à la surface du sol. Dans cette partie de l'étude nous discutons de la qualité et de la performance des mesures des capteurs ainsi que des résultats obtenus au cours des deux phases d'infiltration. En outre, ces résultats sont comparés avec ceux obtenus pour le même sol, non-traité à la chaux, dans les travaux de Song (2014).

La variation de l'humidité relative dans le temps (Figure 5.4a) est similaire à celle observée par Loiseau et al. (2002) et Ta (2009) : l'humidité h proche de la source d'eau augmente rapidement tandis que le taux d'augmentation est plus faible à une distance plus importante de la source d'eau. On note que la source d'eau est à la surface pour la première phase d'infiltration et au fond pour la deuxième phase d'infiltration. La similitude existe aussi entre les résultats de mesure de teneur en eau obtenus par les capteurs ThetaProbe (Figure 5.4b) et ceux de Kröhn (2003) et Ta (2009).

La concordance trouvée entre l'évolution des résultats de mesure de teneur en eau et des résultats de succion au cours des deux phases d'infiltration confirme la performance de ces capteurs. En outre, la similarité au début de la première phase d'infiltration des valeurs de teneur en eau mesurées sur l'ensemble de la hauteur du massif de sol par les capteurs ThetaProbe confirme l'homogénéité du massif de sol après le compactage en termes de teneur en eau volumique et de densité.

Comme indiqué sur la Figure 5.4b, à la fin de la première phase d'infiltration, les réponses des capteurs ThetaProbe sont différentes de celles estimées à 56 % pour le sol saturé, avec une masse volumique des particules solides de $2,7 \text{ Mg/m}^3$, en considérant 35 mm de gonflement (Figure 5.4e) plus 10 mm de gonflement antérieurement après le compactage. Cependant, ces valeurs de teneur en eau volumique mesurées par des mêmes capteurs ThetaProbe, à la fin de la deuxième phase d'infiltration, sont proches des valeurs estimées. Pour comparer avec le sol non-traité à la chaux, on trouve que les valeurs de teneur en eau volumique mesurées par les capteurs ThetaProbe de ce type de sol, mais sans traitement à la chaux, sont proches de celles mesurées à la fin de la deuxième phase d'infiltration (Figure 5.20). En outre, il faut noter qu'il n'y a pas de différence entre les valeurs de teneur en eau volumique du sol non-traité à la fin de la première infiltration et à la fin de la deuxième infiltration (Song 2014). Ceci montre que l'effet du traitement à la chaux sur la teneur en eau volumique du sol traité disparaît après un cycle d'humidification-séchage.

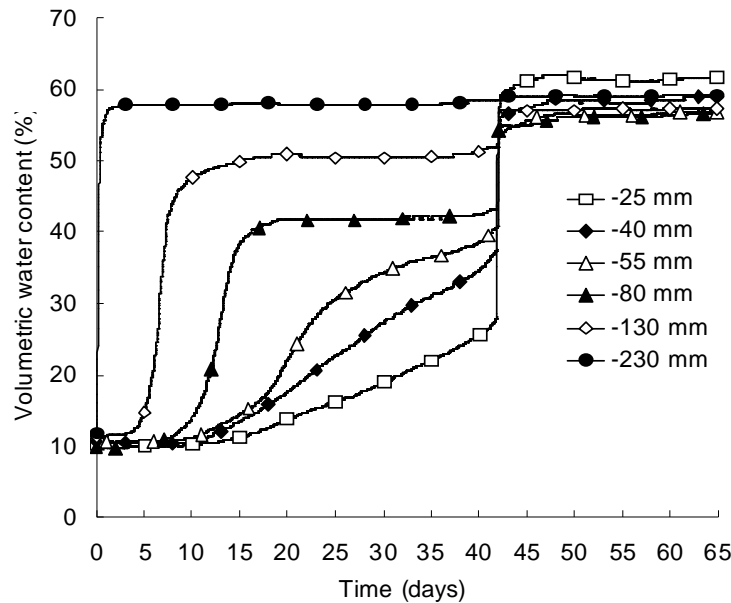


Figure 5.20 : Variation de teneur en eau volumique au cours du temps pour l’infiltration 1 de l’argile d’Héricourt non-traitée (Song 2014)

Le gonflement, au cours du temps, du sol traité à la chaux dans cette étude (Figure 5.4e) est un peu différent de celui obtenu par Abduljawwad et al. (1998), Kim et al. (1999) et Ta (2009). Dans leurs études, l’humidification provoque un gonflement rapide au début du processus et après, le taux du gonflement est progressivement décroissant. Cependant, pour le sol traité à la chaux, le gonflement se produit quasi immédiatement et se stabilise rapidement après quelques heures de contact avec l’eau. Ce phénomène peut être expliqué par l’expansion de la chaux (hydratation et transformation de la chaux vive en chaux éteinte) au contact de l’eau et une valeur de conductivité hydraulique élevée du sol traité à la chaux, ce qui est démontré à l’échelle de l’éprouvette dans le chapitre 1. Dans notre cas d’étude, à l’échelle d’une éprouvette de 20 mm, le taux de gonflement du sol traité à la chaux se stabilise pour un taux de gonflement de 18 % après immersion dans l’eau (chapitre 1). Par ailleurs, le taux de gonflement total mesuré pour le massif de sol est d’environ 45 mm, ce qui correspond aussi à un taux de gonflement de 18 %, identique au taux de gonflement du sol traité à la chaux à l’échelle de l’éprouvette. En outre, en comparaison avec le résultat du gonflement libre du sol non-traité mesuré à l’échelle de la chambre environnementale, le taux de gonflement du sol traité à la chaux est un peu inférieur à celui du sol non-traité qui est d’environ 65 mm ou 25 % (Figure 5.21). La comparaison entre les résultats du taux de gonflement à l’échelle de la chambre environnementale et à l’échelle de l’éprouvette (chapitre 1) démontre la similitude des résultats.

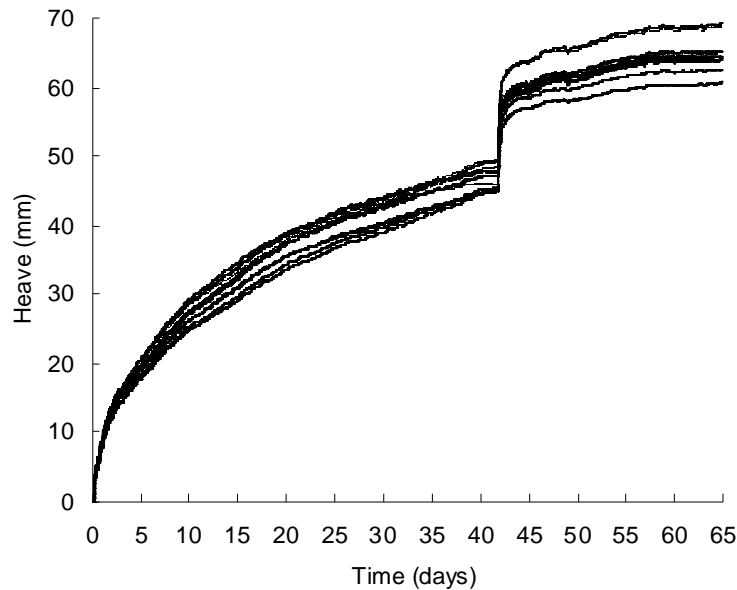


Figure 5.21 : Gonflement libre lors de l'infiltration 1 de l'argile d'Héricourt non-traitée (Song 2014)

La présentation en 3-D du gonflement à $t = 3$ jours (Figure 5.5) montre un effet de bord important à l'échelle de la chambre environnementale : le gonflement mesuré dans la zone au milieu de la surface (35 - 37 mm) est plus grand que celui dans les coins (29 - 30 mm). Il faut noter que ce gonflement ne prend pas encore en compte le gonflement de 10 mm qui a lieu après le compactage. Cet effet peut être expliqué par le frottement entre le sol et les parois, ce frottement diminue le gonflement du sol en contact avec les parois. Une similitude de l'effet de bord est aussi observée pour le gonflement libre de l'argile d'Héricourt non-traitée et de l'argile Verte de Romainville dans la chambre environnementale (Song 2014 ; Ta 2009 ; Cui et al. 2010).

Le gonflement différentiel dans le massif de sol peut être identifié à travers les mesures de teneur en eau volumique par les capteurs ThetaProbe. Par exemple, on trouve que toutes les mesures de teneur en eau sont proches de la valeur de 49 % en fin de première phase d'infiltration (Figure 5.4b) mais il y a un décalage important entre la mesure de teneur en eau du niveau près de la surface et celles des niveaux plus profonds en fin de deuxième phase d'infiltration (Figure 5.6b). Cela signifie que le gonflement du sol traité à la chaux, au cours du premier cycle d'humidification-séchage, est assez homogène. Pour la deuxième phase d'infiltration, la teneur en eau volumique mesurée par le capteur proche de la surface (-25 mm) se stabilise à 62 %. Les valeurs finales de θ sont beaucoup moins importantes aux niveaux plus profonds (56 %). En effet, les valeurs de θ mesurées par les capteurs aux niveaux -40 mm, -80 mm, -130 mm et -230 mm à l'équilibre est environ de 56 % et égale à la valeur estimée à l'état saturé (en prenant une masse volumique sèche initiale de $1,4 \text{ Mg/m}^3$ et de 45 mm de gonflement), tandis que celle mesurée par le capteur au niveau -25 mm est de beaucoup supérieure (62 %). Supposons qu'à l'état d'équilibre le sol soit saturé, les densités sèches peuvent alors être estimées selon les θ mesurées : $\rho_d = 1,02 \text{ Mg/m}^3$ pour le sol près de la surface ; $1,19 \text{ Mg/m}^3$ pour le sol plus profond. Cela signifie que l'humidification entraîne un gonflement important dans la zone proche de la surface, un gonflement plus léger aux niveaux inférieurs. Dans le travail de Lemaire et al. (2004), de Ta (2009) et de Song (2014) où l'essai d'infiltration est aussi effectué en condition de gonflement libre, la densité sèche finale

dans la zone proche de la surface est également inférieure à celle du sol au niveau plus profond.

3.3.2 Séchage

On discute dans cette partie de la pertinence des résultats de mesure et des calculs obtenus pour les deux essais de séchages.

L'effet des conditions aux limites est constaté sur les résultats de température enregistrés dans le séchage 1 et le séchage 2 de la chambre environnementale (dans l'air, dans le sol, à la surface, à l'entrée et à la sortie). En effet, ces résultats montrent une influence importante de la température ambiante : les courbes suivent bien les variations de la température ambiante. Ainsi, la température dans le sol est non seulement influencée par le phénomène d'évaporation mais également par la variation de la température ambiante. Cette influence est souvent observée dans les essais in-situ (Alvenas et Jansson 1997) ou en laboratoire (Kondo et al. 1992) où la température de la salle n'est pas contrôlée.

On trouve que tous les capteurs de mesure de température et d'humidité de l'air et de la surface du sol présentent des fluctuations importantes dans leurs réponses. Ce phénomène est également constaté sur d'autres chambres environnementales ayant des dimensions similaires (Ta 2009 ; Aluwihare et Watanabe 2003 ; van de Griend et Owe 1994). En fait, dans ces études, comme le vent est souvent turbulent, les mesures fluctuent en conséquence. Néanmoins, sur l'ensemble des résultats obtenus, la fluctuation est relativement petite et n'affecte donc pas la tendance générale de la grandeur physique mesurée.

Les séchages 1 et 2 montrent des variations de teneur en eau sur l'ensemble du massif de sol de la surface jusqu'à -230 mm. La teneur en eau au niveau -230 mm du massif de sol diminue dans le séchage 2, moins que dans le séchage 1. Cela montre que l'évaporation peut pénétrer jusqu'à 230 mm dans le massif du sol pour les conditions atmosphériques des deux essais. Plus la zone est proche de la surface, plus l'influence de l'évaporation est importante. Cette influence de l'évaporation est aussi confirmée par les mesures de succion. On note que l'influence sur une zone limitée est également observée sur les profils de teneur en eau dans les travaux de Kondo et al. (1992), de Wilson et al. (1994) et de Ta (2009). Par exemple, dans le travail de Kondo et al. (1992), sur deux colonnes de sable et de limon, le sol est desséché à la surface tandis qu'à partir de 80 mm de profondeur, aucune variation de teneur en eau n'est observée. En fait, la profondeur de la zone affectée par l'évaporation en terme de variations de teneur en eau dépend fortement de la durée de l'essai, du taux d'évaporation et en particulier de la perméabilité du matériau. En effet, dans le travail de Wilson et al. (1994) avec une colonne de sable, 5 jours suffisent pour diminuer la teneur en eau à 250 mm de profondeur de 20 à 15%, 42 jours sont nécessaires pour une diminution de 20% à 5%. En revanche, dans le séchage 4 du travail de Ta (2009) sur l'argile Verte de Romainville, 70 jours sont nécessaires pour faire varier la teneur en eau à 50 mm de profondeur.

A la fin du séchage 2, le sol dans la chambre est prélevé sur toute la profondeur pour la vérification des teneurs en eau et des masses volumiques. La Figure 5.22 et la Figure 5.23 présentent les profils de teneur en eau massique et le profil de masse volumique du sol dans la chambre environnementale à la fin du séchage 2. Il faut noter que les valeurs de teneur en eau massique et de masse volumique du sol présentées dans ces deux figures sont les valeurs moyennes pour une couche de 50 mm de sol. On remarque que ce profil de teneur en eau dans la Figure 5.22 a une allure similaire à celui mesuré par les capteurs ThetaProbe à la fin du séchage 2 dans la Figure 5.14. Pour le profil de la masse volumique du sol (Figure 5.23), il

apparaît que le sol proche de la surface est plus lâche que celui plus en profondeur, ce qui est aussi concordant avec les mesures de teneur en eau volumique.

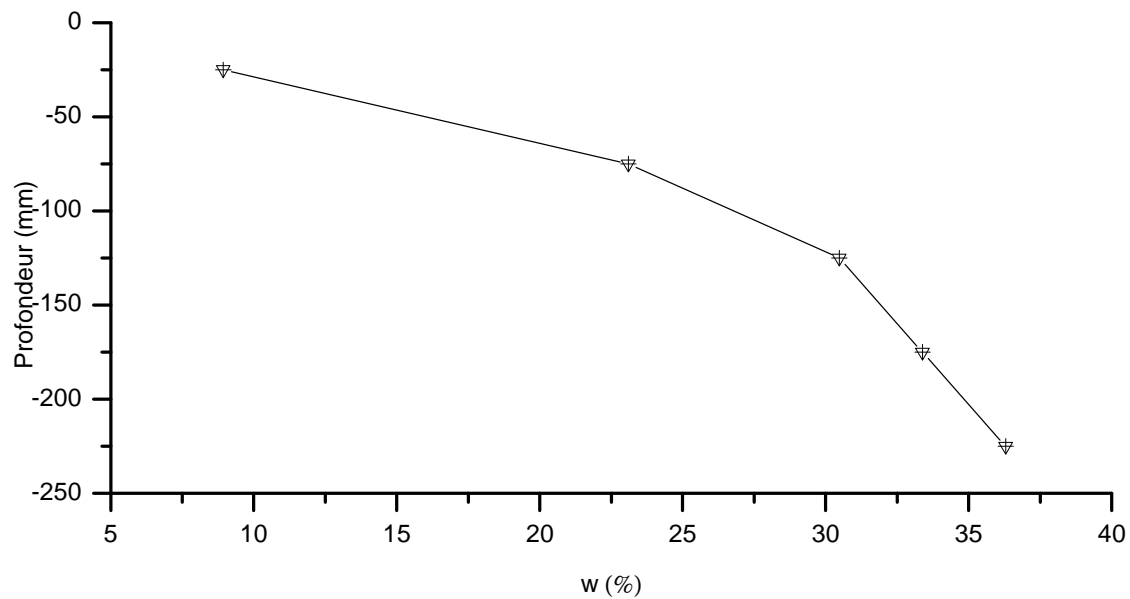


Figure 5.22 : Profil de teneur en eau massique du sol à la fin du séchage 2

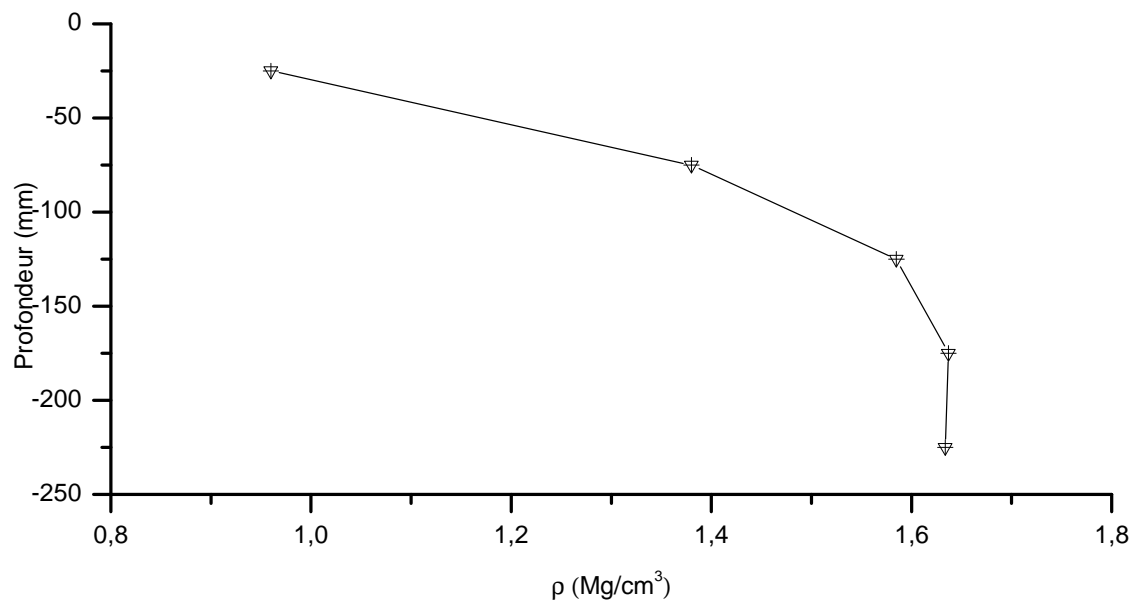


Figure 5.23 : Profil de masse volumique du sol à la fin du séchage 2

En outre, on remarque aussi l'effet du niveau d'eau sur l'évaporation dans cette étude. En effet, les mesures d'humidité relative de l'air, de teneur en eau et de succion du sol ne diminuent pas quand le niveau d'eau dans le réservoir est au niveau supérieur de la surface de sol. Cependant, ce phénomène est différent dans le cas du sol non-traité. Les mesures de ces paramètres diminuent même avec le niveau d'eau dans le réservoir qui est au niveau supérieur de la surface de sol (Song 2014). Cette différence peut être expliquée par la conductivité hydraulique plus élevée du sol traité à la chaux par rapport à celle du sol non-traité.

On observe une augmentation de température sur l'ensemble du massif de sol dans les deux séchages quand la température de l'air augmente. Ce phénomène est également observé sur le profil de température après 12 jours d'essai dans le travail de Wilson et al. (1994). En fait, quand la température de l'air augmente, elle fournit une quantité d'énergie plus importante que celle nécessaire pour l'évaporation (bien que le taux d'évaporation augmente aussi) et fait augmenter par la suite la température à la surface et dans le sol. Dans le cas où les conditions atmosphériques sont maintenues constantes, l'augmentation de la température dans l'ensemble du massif est due à la diminution du taux d'évaporation qui se traduit ensuite par une demande d'énergie moins importante.

Avec les courbes de rétention d'eau et les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion lors des deux séchages, on observe un effet de la profondeur sur ces courbes. Ce phénomène peut être expliqué par un gonflement dépendant de la profondeur du sol : plus la profondeur est faible, moins forte est la contrainte au niveau du sol et plus important est le gonflement. Cet effet est aussi constaté dans les essais d'infiltration et d'évaporation dans la chambre environnementale sur l'argile d'Héricourt non-traitée (Song 2014) et l'Argile Verte de Romainville (Cui et al. 2010). En outre, on trouve que la courbe de rétention d'eau du séchage 2 est supérieure à celle du séchage 1 et dans le même ordre de grandeur que pour la courbe de rétention d'eau du sol non-traité, ce qui montre que l'effet du traitement à la chaux sur cette courbe est supprimé après deux phases d'infiltration. Pour l'évolution de la conductivité hydraulique non saturée de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux en fonction de la succion, on observe une diminution de la valeur de la conductivité hydraulique saturée (d'environ 10^{-7} m/s à 10^{-16} m/s pour la succion de 100 MPa) en cours de séchage. Une tendance inverse a été observée sur l'évolution de la conductivité hydraulique non saturée de l'Argile Verte de Romainville pendant l'infiltration : cette valeur augmente de 10^{-14} m/s (pour la succion de 100 MPa) à 10^{-11} m/s (pour la succion de 1 MPa) (Cui et al. 2010).

4. Evolution de la microstructure et de la fissuration de l'argile d'Héricourt dans la chambre environnementale

4.1. Evolution de la microstructure de l'argile d'Héricourt traitée

Cette partie a pour but de caractériser la microstructure de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux à l'échelle de la chambre environnementale en utilisant les mêmes techniques que dans le chapitre 1 : la porosimétrie au mercure et la microscopie électronique à balayage (MEB). L'objectif est de relier des caractéristiques de microstructure à des paramètres évalués au cours des processus d'infiltration et d'évaporation dans la chambre environnementale. Les échantillons utilisés pour l'analyse microstructurale dans cette partie sont préparés par lyophilisation comme dans le chapitre 1.

Pour rappel, le massif de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux a été soumis à deux cycles d'humidification-séchage dans la chambre environnementale. Ce massif de sol est un grand échantillon de 0,25 m de hauteur, 1,00 m de longueur, 0,80 m de largeur qui est compacté manuellement en 5 couches à une masse volumique sèche de $1,40 \text{ Mg/m}^3$. Après le compactage, le sol est soumis à la première phase d'humidification par la pluie artificielle jusqu'à l'état saturé. Une petite colonne de 30 mm de diamètre de sol saturé est ensuite prélevée dans la chambre pour les études de microstructure. Après la saturation, le sol est soumis au séchage par l'essai d'évaporation jusqu'à l'équilibre des paramètres mesurés. Le sol est prélevé à nouveau après cette phase de séchage pour les études de microstructure. Les deuxièmes phases d'humidification et de séchage sont répétées. Après chaque phase, le sol est aussi prélevé pour les études de microstructure. La Figure 5.24 présente les positions des

prélèvements des échantillons dans la chambre environnementale après chaque phase d'essai. On note que les prélèvements sont faits aux quatre coins de la chambre environnementale pour éviter les capteurs enterrés dans le sol et 200 mm éloignés de murs de la chambre pour éviter l'effet de bord de gonflement.

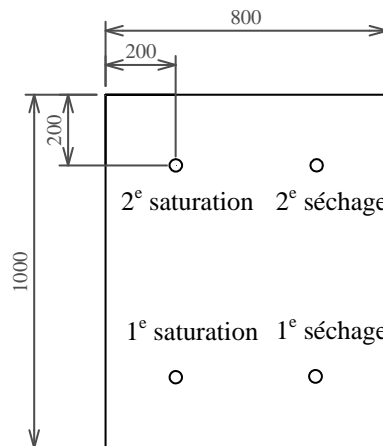


Figure 5.24 : Positions des prélèvements des échantillons dans la chambre environnementale pour l'étude microstructurale

Après la première phase d'humidification, quatre échantillons de sol à différents niveaux sont prélevés pour étudier l'évolution de la microstructure. La Figure 5.25 présente les courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux, prélevée en quatre niveaux proches de la surface dans la chambre de environnementale après la première saturation. La Figure 5.25a montre que le volume poreux cumulé des deux échantillons proches de la surface est d'environ $0,44 \text{ cm}^3/\text{g}$ et est plus important que celui des deux échantillons inférieurs. Ceci peut être expliqué par une teneur en eau un peu plus élevée de ces deux échantillons proches de la surface par rapport aux deux autres. Il faut noter que les mesures de teneur en eau des capteurs ThetaProbe après la première phase d'humidification montrent aussi une légère différence entre la teneur en eau des niveaux proches de la surface et des niveaux inférieurs. Les courbes de distribution des rayons d'accès de pores montrent que les quatre échantillons de sol traité à la chaux, aux quatre niveaux, après la première saturation ont deux familles de pores : des pores intra-agrégat centrés vers $0,01 \mu\text{m}$ et des pores inter-agrégats (naturels et compactés) centrés vers $3 \mu\text{m}$, avec la famille de pores inter-agrégats compactés de volume significatif (Figure 5.25b). Cette microstructure est déjà observée dans l'échantillon traité à la chaux à l'échelle de l'éprouvette (chapitre 1) pour la même gamme de dimension des deux familles de pores. En outre, on trouve que le volume poreux de la famille de pores inter-agrégats (naturels et compactés) ($r > 0,15 \mu\text{m}$) représente environ 76 % du volume poreux total pour les deux échantillons proches de la surface et 69 % pour les deux échantillons inférieurs. On note que les volumes des pores intra-agrégat ainsi que des pores inter-agrégats de ces échantillons sont presque égaux. Le décalage de volume poreux total cumulé entre les deux échantillons proches de la surface et les deux inférieurs concerne donc le volume poreux de la famille de pores inter-agrégats naturels. Ceci montre qu'à l'état saturé, seule la famille de pores inter-agrégats naturels contribue au changement de volume total de l'échantillon du sol traité à la chaux.

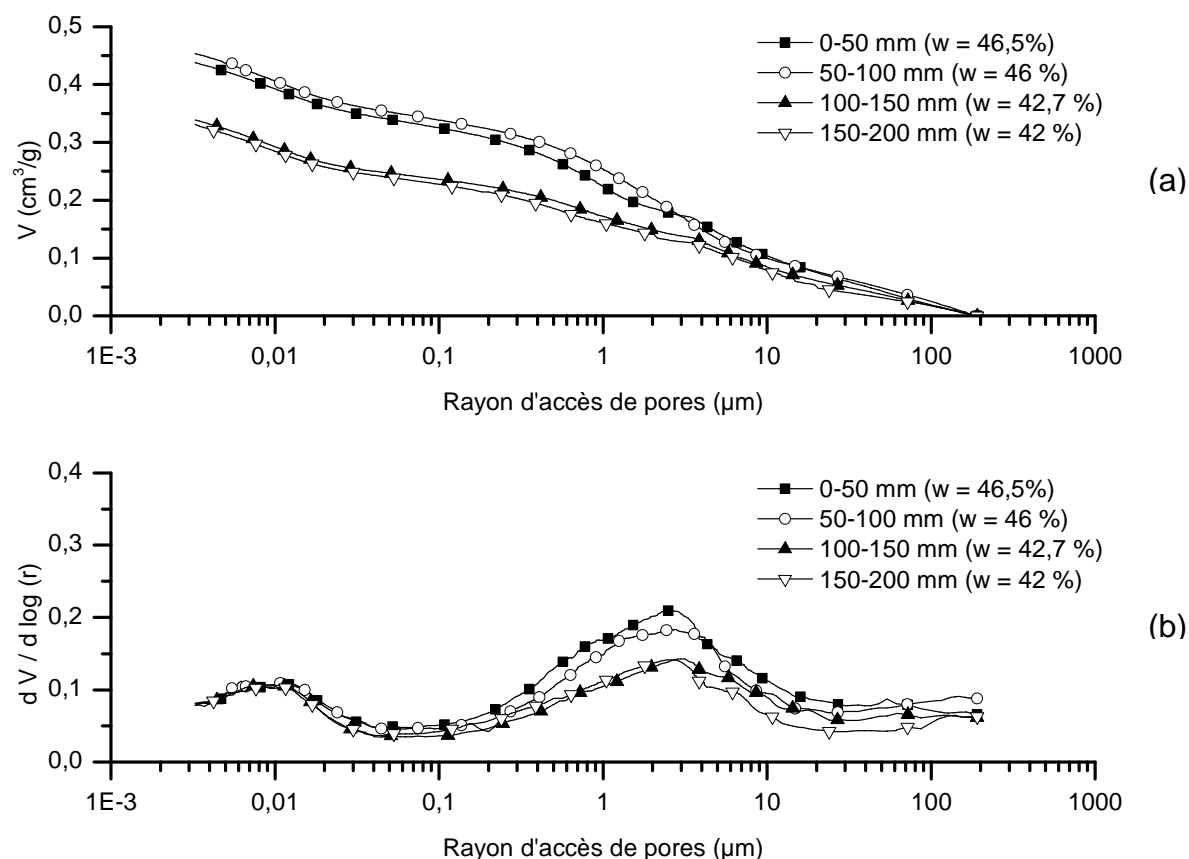


Figure 5.25 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase d'humidification.

Deux échantillons de sol après la première saturation, au niveau 0-50 mm et au niveau -100-150 mm, sont choisis pour étudier l'évolution de la microstructure grâce au MEB. Les photos de MEB de ces deux échantillons ont prises à deux échelles différentes et présentées dans la Figure 5.26. A un faible grossissement, la Figure 5.26a et la Figure 5.26c montrent que la microstructure du sol traité à la chaux, après la première saturation, est très aérée et granulaire. Des pores inter-agrégats de quelques microns avec la présence d'hydrates (CSH) sont observés à cette échelle. A plus fort grossissement, les silicates de calcium hydratés (CSH), de forme réticulaire, sont observés clairement dans les Figures 5.26b et d. On note que cette microstructure résulte du traitement à la chaux, les hydrates qui se développent dans les pores inter-agrégats ont déjà été observées dans l'échantillon de sol traité à la chaux saturé à l'échelle de l'éprouvette (chapitre 1).

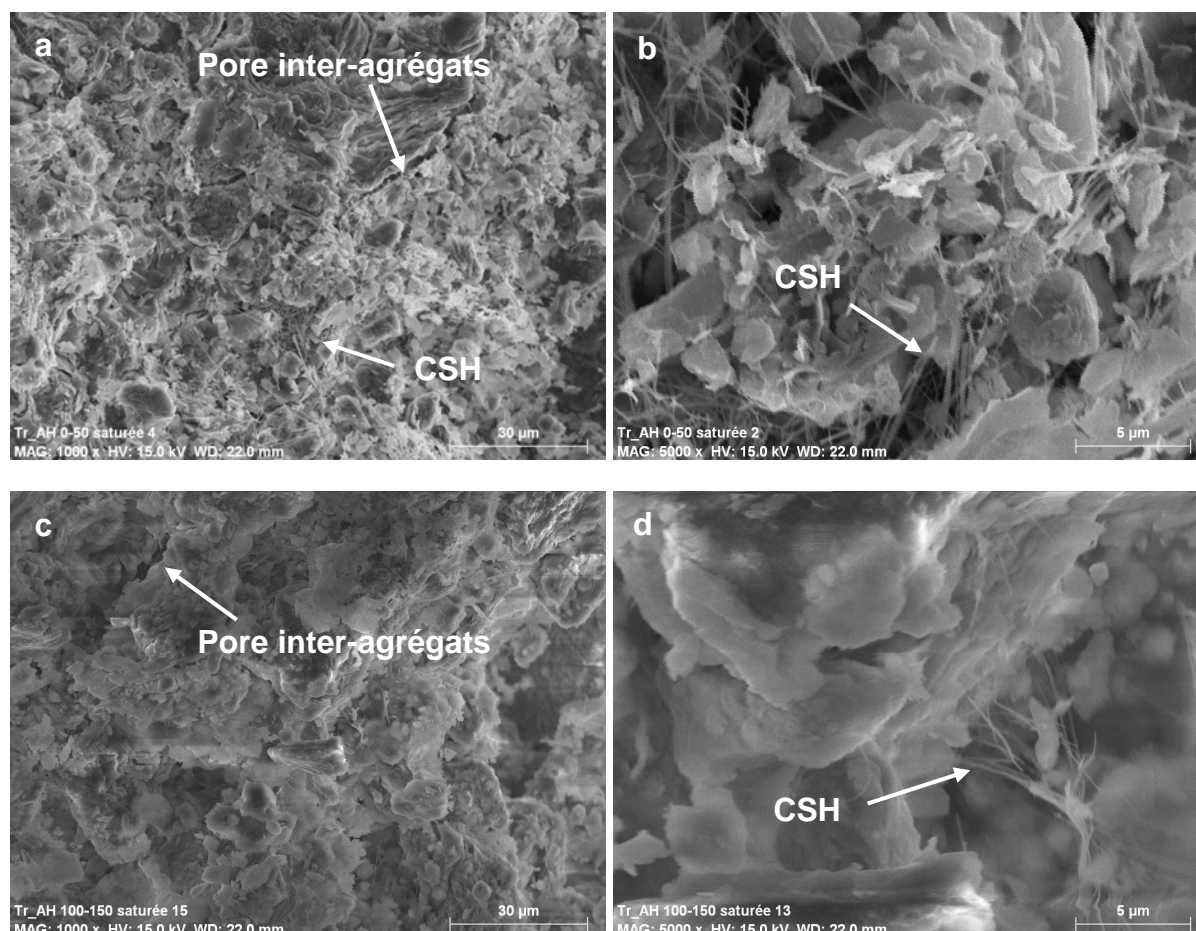


Figure 5.26 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase d'humidification : a, b : Echantillon au 0-50 mm ; c, d : Echantillon au -100-150 mm

Après la première phase de séchage, trois échantillons de sol en différents niveaux sont prélevés pour étudier l'évolution de la microstructure. La Figure 5.27 présente les courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) du sol traité à la chaux, pour des prélèvements sur trois niveaux proches de la surface dans la chambre environnementale, après le premier séchage. La Figure 5.27a montre que le volume poreux cumulé des deux échantillons aux niveaux -50-100 mm et -100-150 mm est d'environ $0,34 \text{ cm}^3/\text{g}$ et est plus important que celui de l'échantillon proche de la surface. Ceci peut être expliqué par la teneur en eau plus élevée de ces deux échantillons par rapport à l'échantillon proche de la surface. On trouve également que ces valeurs de teneur en eau massique sont concordantes avec les mesures de teneur en eau des capteurs ThetaProbe à la fin du premier séchage. Les courbes de distribution des rayons d'accès de pores montrent que, pour les échantillons de sol aux niveaux -50-100 mm et -100-150 mm, le séchage conduit à une diminution du volume des pores inter-agrégats naturels tandis que le volume des pores inter-agrégats compactés ne change pas. Ceci conduit à une diminution du volume poreux total des pores. On note qu'il y a une légère agmentation du volume des pores intra-agrégat mais avec aucun changement dans la taille de cette famille des pores pendant le séchage. Pour l'échantillon de sol près de la surface, le séchage détruit quasi complètement les pores inter-agrégats (naturels ainsi que compactés). Une autre famille de pores centrée vers $100 \mu\text{m}$ est observée mais il ne s'agit pas de pores entre des agrégats argileux. Cette famille de pores est aussi observée dans la poudre argileuse (chapitre 2), ce qui montre que le sol près de la surface se transforme en poudre

après le séchage. Cependant, aucun changement dans la taille des pores intra-agrégat n'est observé pour ce sol. En outre, on trouve que le volume poreux de la famille de pores inter-agrégats (naturels et compactés) est d'environ 35 % du volume poreux total pour l'échantillon au niveau 0-50 mm et 56 % du volume poreux total pour les deux échantillons aux niveaux -50-100 mm et -100-150 mm. En comparaison avec les pourcentages de volume de pores inter-agrégats par rapport au volume poreux total des échantillons après la première saturation, ces pourcentages montrent que la quantité de pores inter-agrégats (naturels et compactés) des trois échantillons diminue après le séchage, ce qui entraîne la diminution du volume poreux total cumulé. En outre, on note que le volume des pores inter-agrégats compactés ne change pas. Ainsi, seule la famille de pores inter-agrégats naturels du sol traité à la chaux est affectée par le séchage.

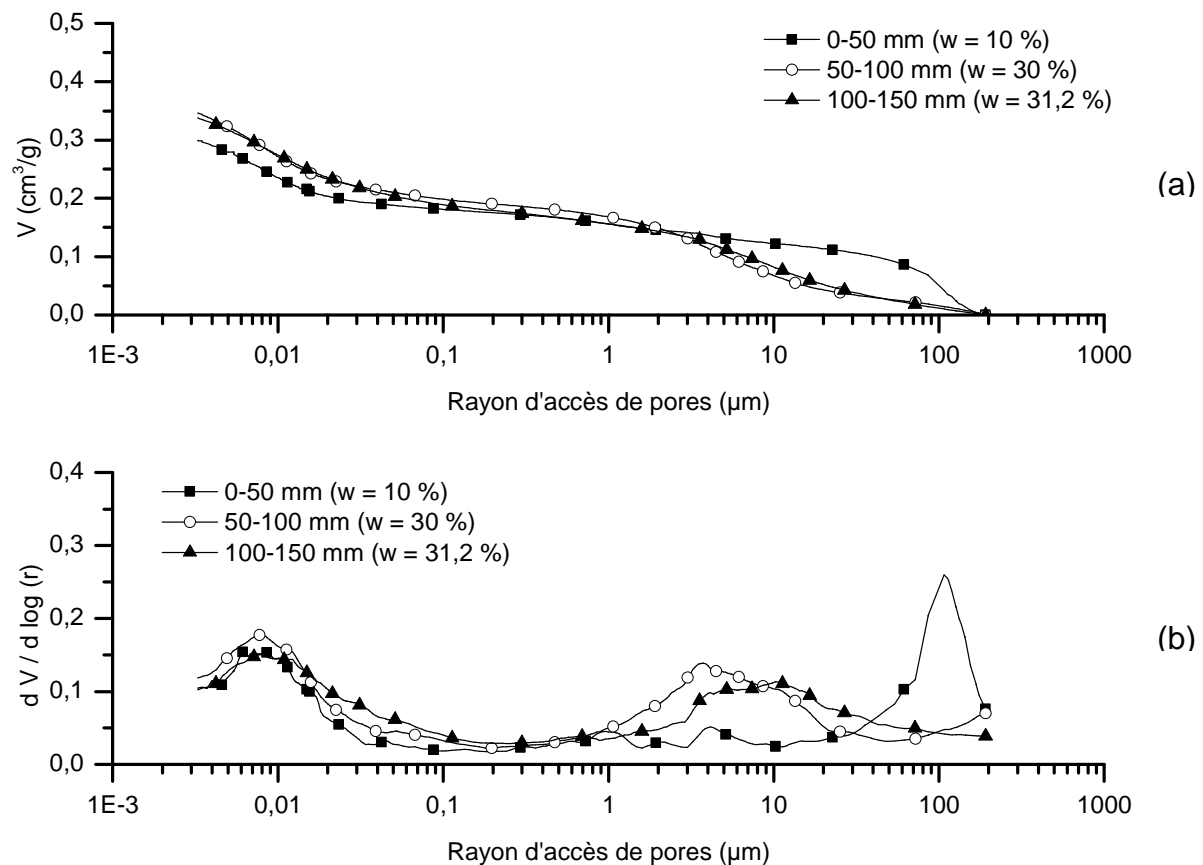


Figure 5.27 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase de séchage.

Trois échantillons de sol au niveau 0-50 mm, -50-100 mm et -100-150 mm sont étudiés après le premier séchage, grâce au MEB. Les photos au MEB de ces trois échantillons sont prises à deux échelles différentes et présentées dans la Figure 5.28. A un faible grossissement, les Figures 5.28a, c et e montrent que la microstructure de l'échantillon au niveau 0-50 mm, après le premier séchage, et la microstructure des deux échantillons aux niveaux plus profonds sont différentes. Pour l'échantillon près de la surface, une microstructure dense est observée (Figures 5.28a) tandis que les deux échantillons aux niveaux plus profonds ont une microstructure plus aérée avec de grands pores inter-agrégats (Figures 5.28c, e). Des hydrates (CSH) sont observés partout dans ces photos. A plus fort grossissement, les silicates de calcium hydratés (CSH), de forme réticulaire, sont observés plus clairement dans les Figures 5.28b, d et f. On trouve qu'après 6 mois de cure, ce réseau formé par les hydrates est plus

dense que celui après la première saturation et il se développe partout entre les agrégats argileux, les reliant entre eux. Par endroits dans l'échantillon, on observe des plaquettes de CSH résultant de réseaux d'hydrates très denses.

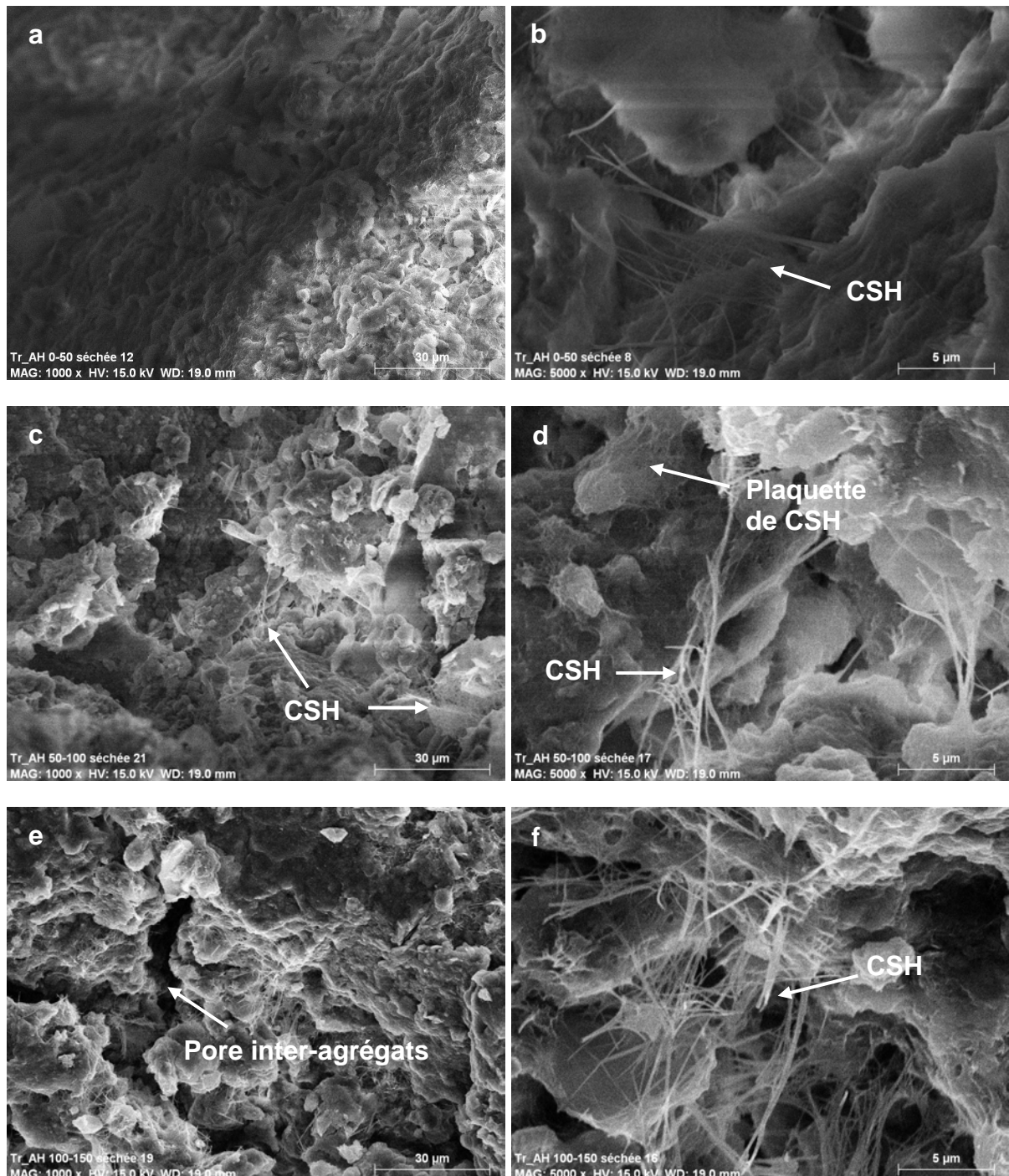


Figure 5.28 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la première phase de séchage : a, b : Echantillon au niveau 0-50 mm ; c, d : Echantillon au niveau -50-100 mm ; e, f : Echantillon au niveau -100-150 mm

Après la deuxième phase d'humidification, trois échantillons de sol, pour les trois niveaux, sont prélevés pour étudier la microstructure. La Figure 5.29 présente les courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) du sol traité à la chaux, pour des

prélèvements dans trois niveaux proches de la surface dans la chambre de environnementale, après la deuxième saturation. La Figure 5.29a montre que le volume poreux cumulé des trois échantillons sont proches. Il est d'environ $0,43 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour l'échantillon à la surface et $0,40 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour des deux échantillons inférieurs. Ceci peut être expliqué par la teneur en eau proche de ces trois échantillons. On remarque aussi que les mesures de teneur en eau des capteurs ThetaProbe après la deuxième phase d'humidification montrent aussi une légère différence avec la teneur en eau du niveau proche de la surface et des niveaux inférieurs. Les courbes de distribution des rayons d'accès de pores montrent que les trois échantillons de sol traité à la chaux aux trois niveaux après la deuxième saturation ont deux familles de pores : des pores intra-agrégat centrés vers $0,01 \mu\text{m}$ et des pores inter-agrégats (naturels et compactés) centrés vers $3 \mu\text{m}$, avec une famille de pores inter-agrégats compactés de volume significatif (Figure 5.29b). Cette microstructure et les gammes de dimensions de pores sont similaires à ce qui est observé pour la microstructure dans les échantillons après la première saturation. Cependant, on trouve que le volume poreux de la famille de pores inter-agrégats (naturels et compactés) ($r > 0,15 \mu\text{m}$) n'est que d'environ 59 % du volume poreux total pour ces trois échantillons, ce qui est relativement moins important que ce qui est obtenu pour les échantillons après la première saturation. Autrement dit, le volume de pores inter-agrégats (naturels et compactés) dans le sol diminue relativement après la deuxième phase d'humidification par rapport au volume de pores intra-agrégat. Il faut noter que la taille de pores intra-agrégat ne change pas. Ce phénomène peut être expliqué par le fait qu'après un certain temps de cure, les hydrates se développent et remplissent les pores inter-agrégats et font disparaître ces pores.

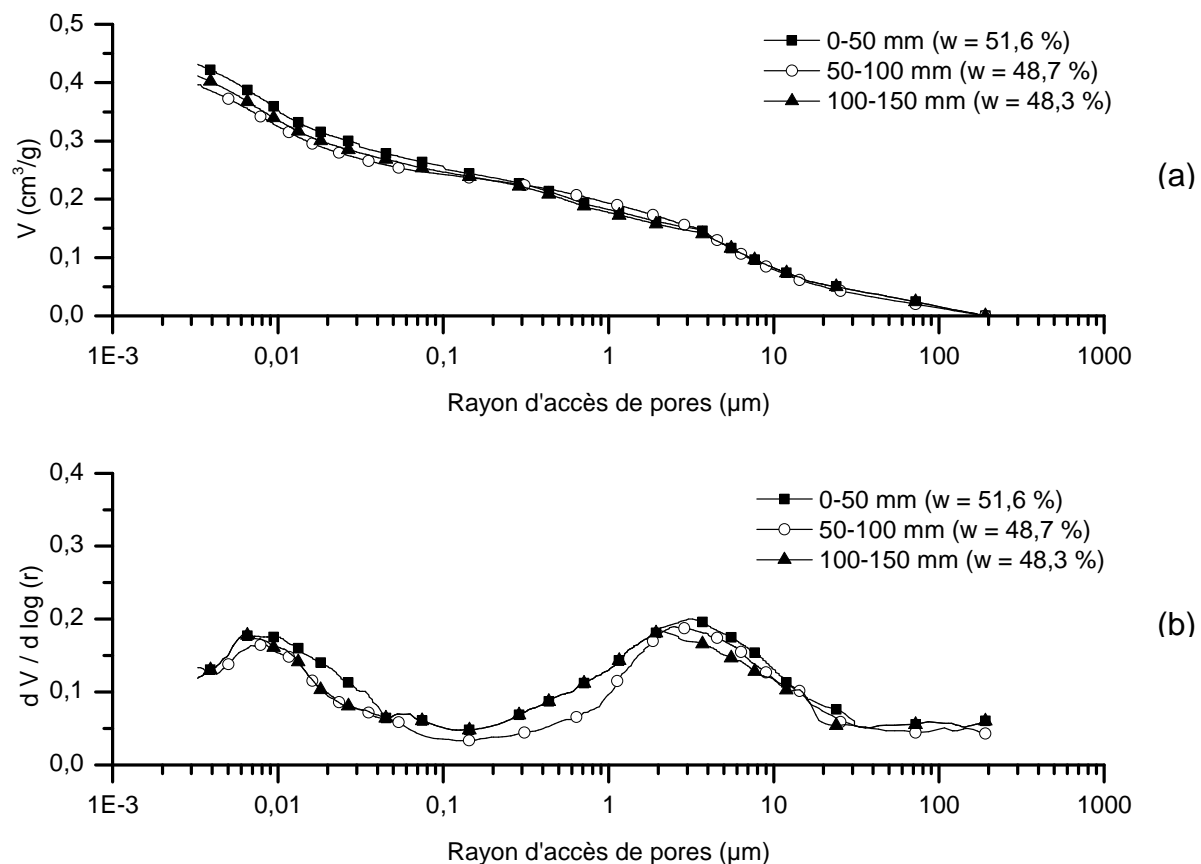


Figure 5.29 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase d'humidification.

Pour le sol après la deuxième saturation, la microstructure de seulement deux échantillons, au niveau -50-100 mm et au niveau -100-150 mm, est étudiée au MEB à cause de la difficulté de préparation de l'échantillon de sol prélevé près de la surface, de consistance très molle. Les photos au MEB de ces deux échantillons sont prises à deux échelles différentes et présentées dans la Figure 5.30. A un faible grossissement, la Figure 5.30a et la Figure 5.30c montrent que la microstructure du sol traité à la chaux après la deuxième saturation n'est pas aussi aérée que celle du sol après la première saturation. Les plaquettes de CSH qui relient des agrégats avec des pores inter-agrégats de quelques microns sont observées à cette échelle. A plus fort grossissement, les silicates de calcium hydratés (CSH) en forme de plaquette sont observés clairement dans les Figures 5.30b et d. On note que ces échantillons de sol sont prélevés après environ 7 mois de cure.

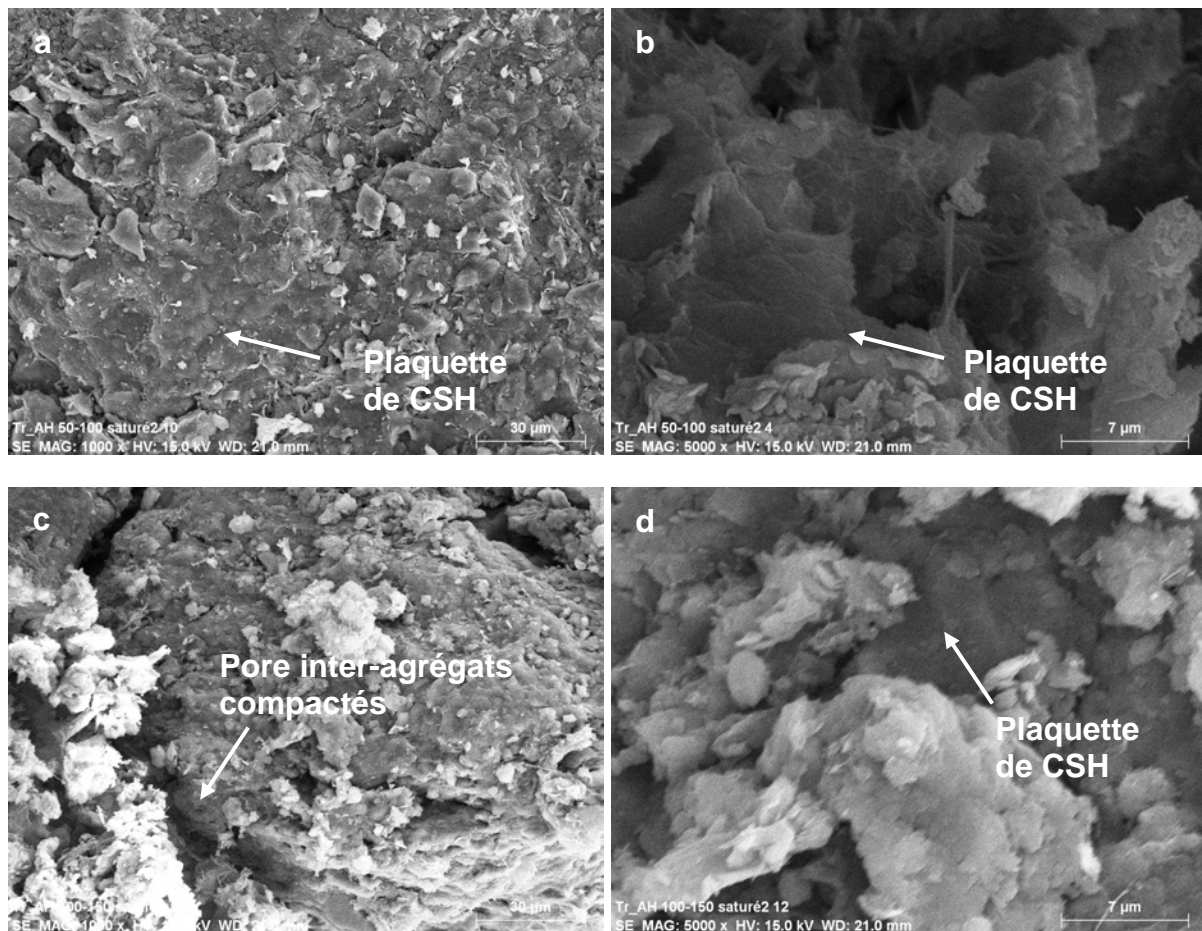


Figure 5.30 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase d'humidification : a, b : Echantillon au niveau -50-100 mm ; c, d : Echantillon au niveau -100-150 mm

A la fin du deuxième séchage, cinq échantillons de sol sur toute la profondeur sont prélevés pour étudier l'évolution de la microstructure. La Figure 5.31 présente les courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) du sol traité à la chaux pour des échantillons prélevés aux cinq niveaux dans la chambre environnementale. La Figure 5.31a montre que le volume poreux cumulé des échantillons aux niveaux les plus profonds est d'environ $0,34 \text{ cm}^3/\text{g}$ et plus important que celui de l'échantillon de surface ($0,30 \text{ cm}^3/\text{g}$). Ceci est expliqué par la teneur en eau plus élevée de ces deux échantillons par rapport de l'échantillon de surface. On trouve également que ces valeurs de teneur en eau massique sont concordantes

avec les mesures de teneur en eau des capteurs ThetaProbe à la fin du deuxième séchage. Les courbes de distribution des rayons d'accès de pores montrent que, pour les quatre échantillons de sol aux niveaux les plus profonds, le séchage diminue le volume de pores inter-agrégats naturels tandis que le volume de pores inter-agrégats compactés ne change pas, ceci diminue le volume poreux total des pores. La taille des pores intra-agrégat reste inchangée après deux cycles d'humidification-séchage. Pour l'échantillon de sol près de la surface, comme dans le premier séchage, le deuxième séchage détruit complètement les pores inter-agrégats. Une famille de pores centrée vers 100 μm est aussi observée, ce qui montre que le sol près de la surface se transforme en poudre après le deuxième séchage. La taille des pores intra-agrégat de ce sol ne change pas à la fin du deuxième séchage. En comparaison avec des échantillons après la deuxième saturation, comme pour le premier cycle, on trouve aussi que le volume de pores inter-agrégats (naturels et compactés) de tous les échantillons diminue après le séchage, ce qui cause la diminution du volume poreux total cumulé.

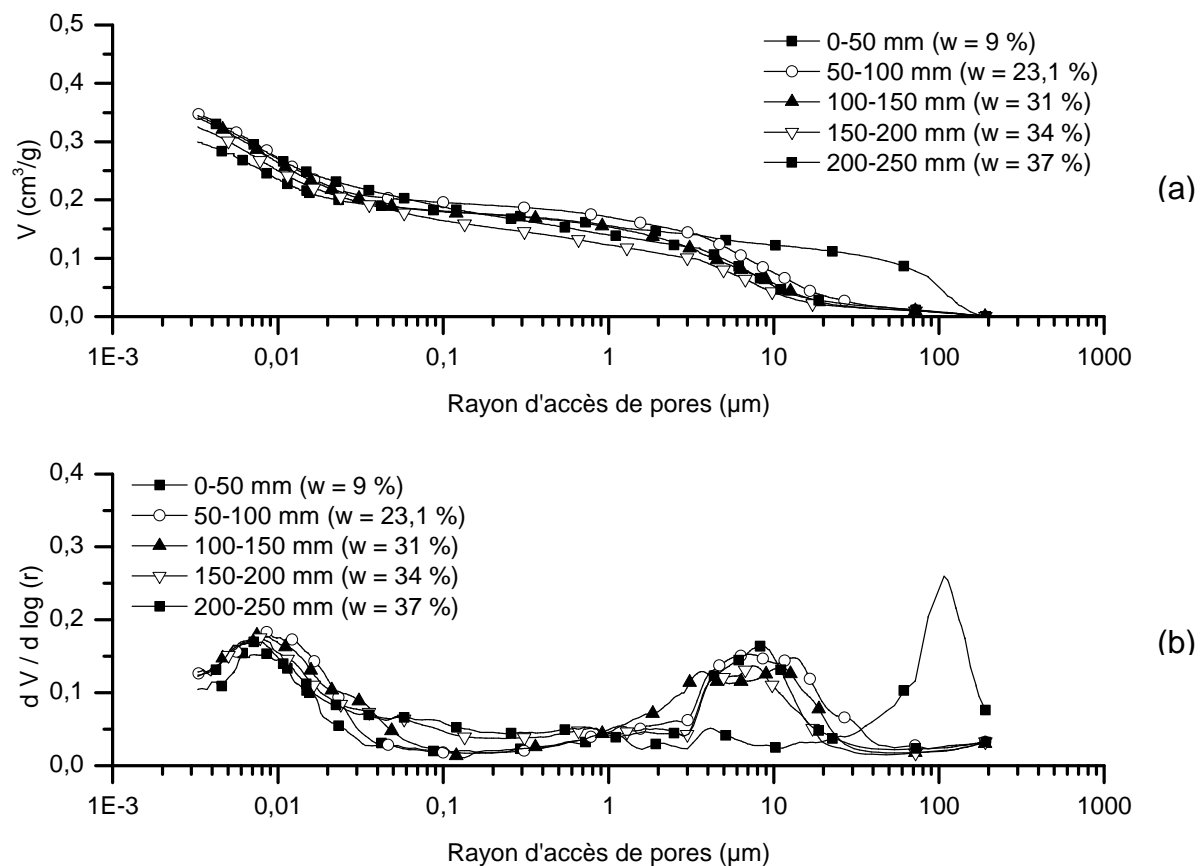
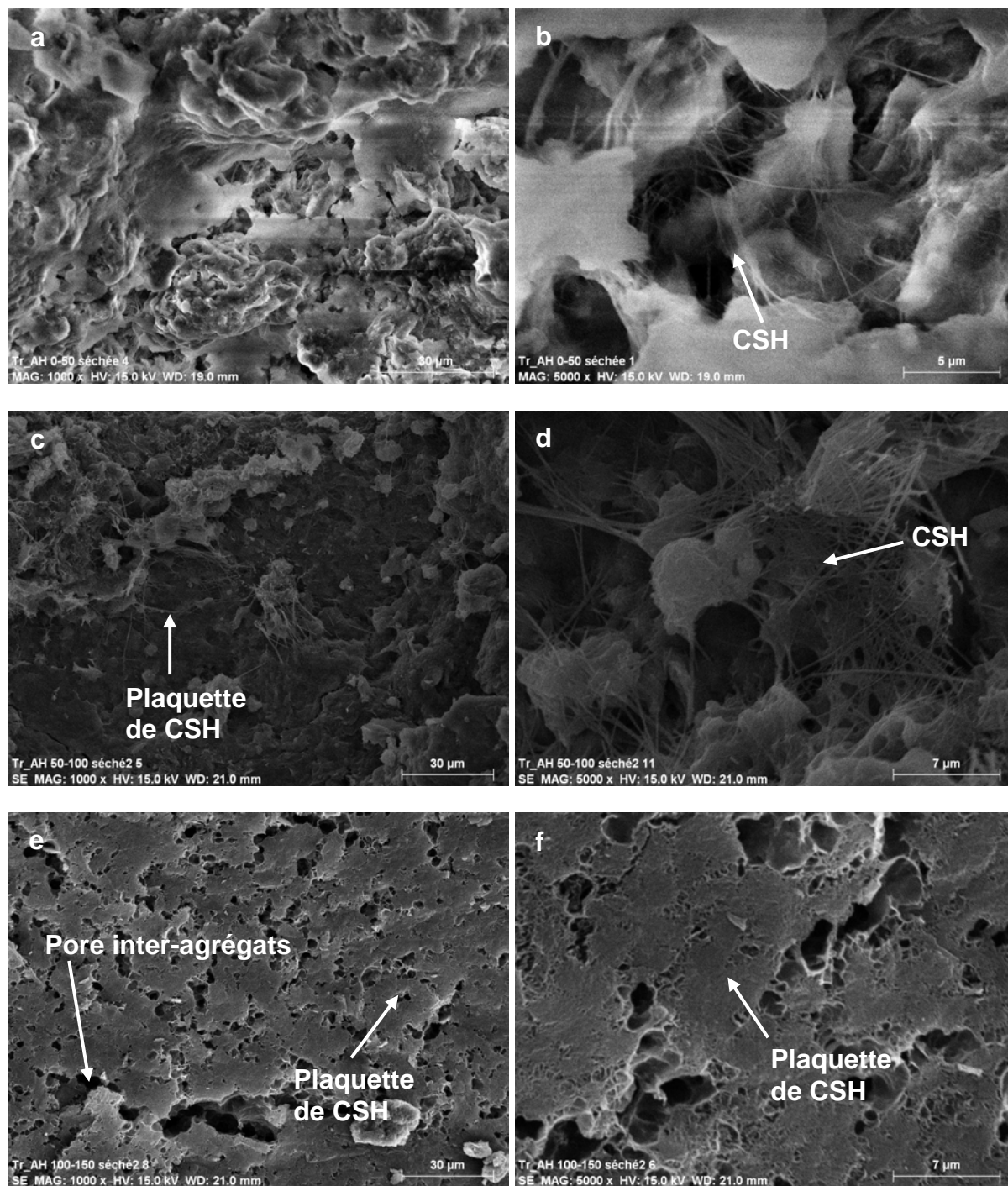


Figure 5.31 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase de séchage.

La microstructure des cinq échantillons de sol est étudiée après le deuxième séchage par observation au MEB. Les photos de MEB des cinq échantillons sont prises à deux échelles différentes et présentées dans la Figure 5.32. A un faible grossissement, sur les Figures 5.32a, c, e, g et i on trouve qu'après un an de cure, des hydrates sous forme réticulaire se développent de façon très dense jusqu'à former des plaquettes partout dans le sol, reliant les agrégats. Quelques grands pores inter-agrégats sont aussi observés dans ces échantillons (Figures 5.32e, g). A plus fort grossissement, les silicates de calcium hydratés (CSH), de forme en plaquette, sont observés plus clairement dans les Figures 5.32b, d, f, h et j. Par

exemple, une plaquette de CSH de 1 à 3 μm d'épaisseur est observée nettement dans la Figure 5.32j.



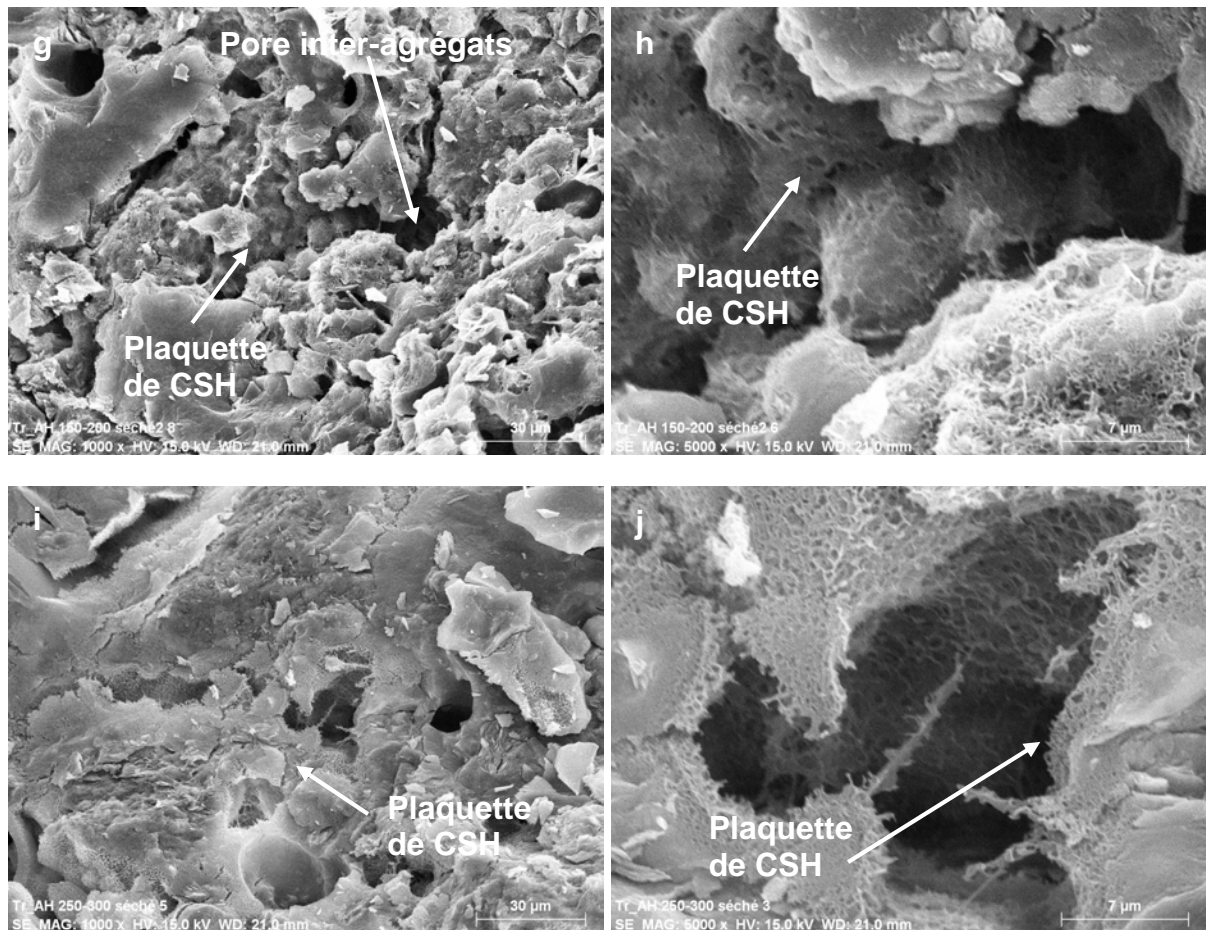


Figure 5.32 : Photos au MEB de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale après la deuxième phase de séchage : a, b : Echantillon au niveau 0-50 mm ; c, d : Echantillon au niveau -50-100 mm ; e, f : Echantillon au niveau -100-150 mm ; g, h : Echantillon au niveau -150-200 mm ; i, j : Echantillon au niveau -200-250 mm

4.2. Fissuration du sol traité à la chaux au cours du séchage dans la chambre environnementale

Il faut noter que la chambre environnementale est équipée d'un appareil photo pour suivre l'évolution des fissures à la surface du sol. Les Figures 5.33 et 5.34 présentent les photos de la surface du sol au début et à la fin du séchage 1 et du séchage 2. A la fin des deux séchages, seules quelques petites fissures sont observées à la surface du sol. Elles sont alors négligeables pour la grande surface (0,8 m x 1 m) de la chambre environnementale. Ceci montre que les fissures de surface du sol traité à la chaux se développent peu au cours du séchage. Ce phénomène se répète pour les deux cycles d'humidification-séchage.

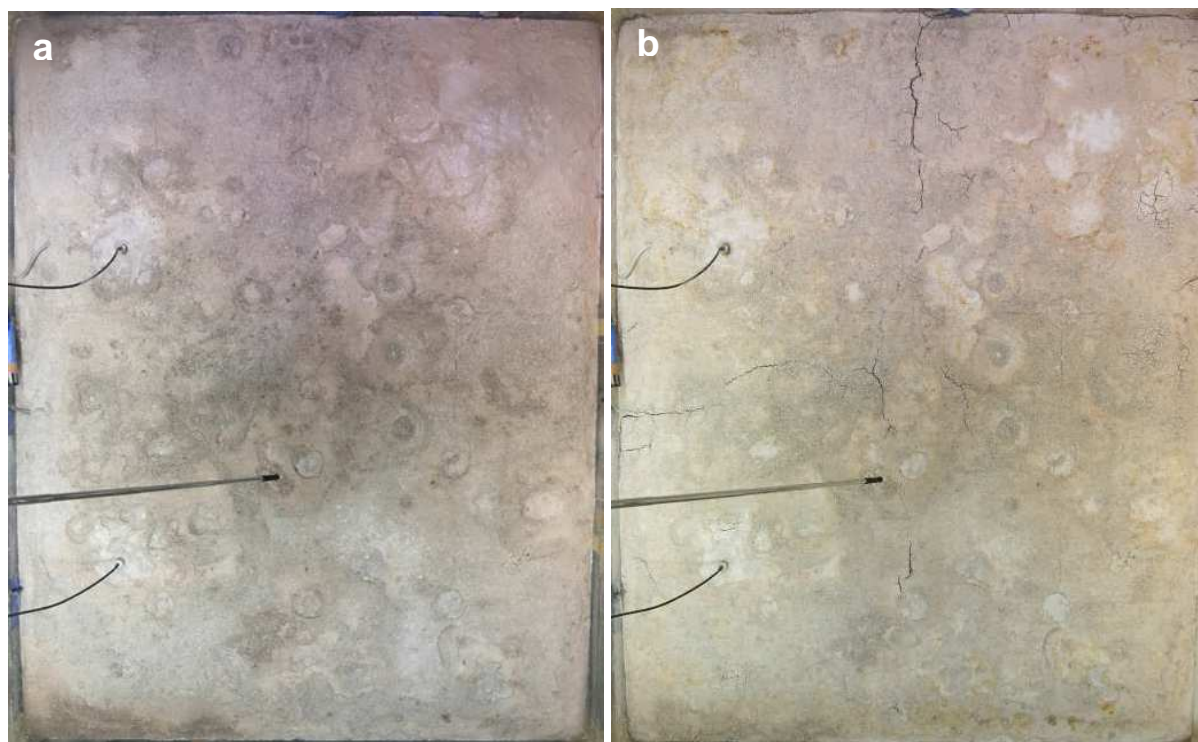


Figure 5.33 : Photos de la surface du sol après le séchage 1 : a : $t = 5$ jours ; b : $t = 156$ jours

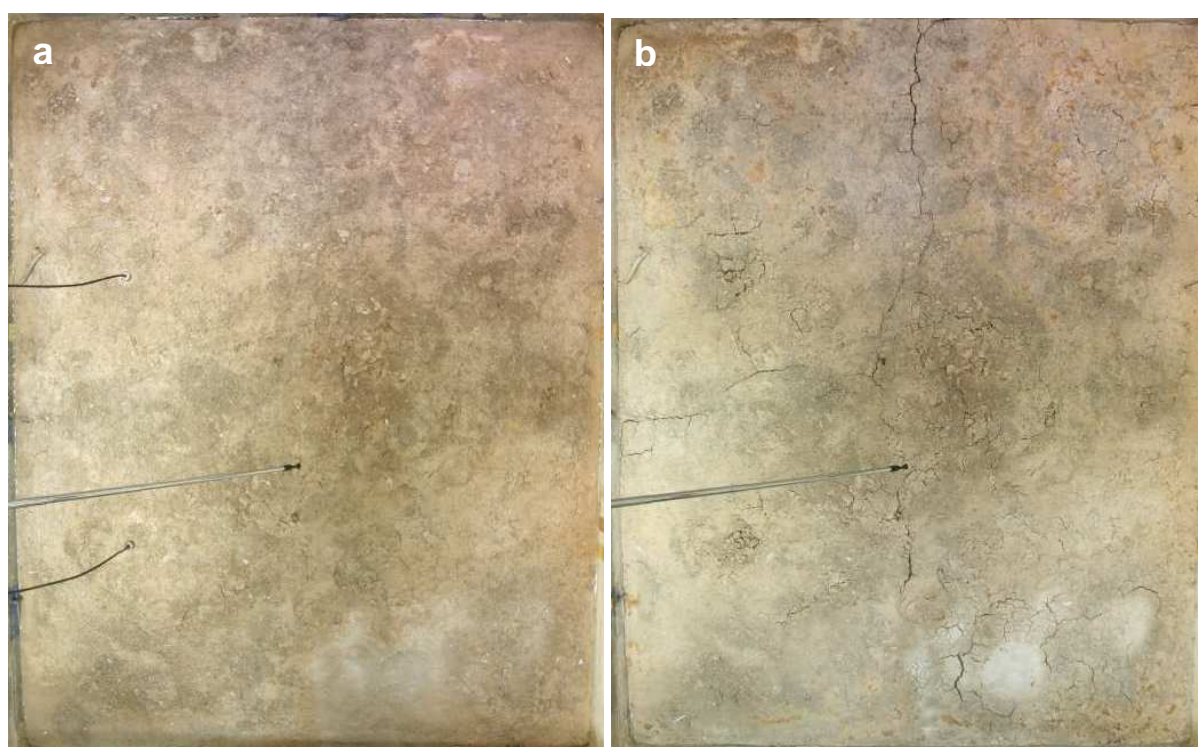


Figure 5.34 : Photos de la surface du sol après le séchage 2 : a : $t = 10$ jours ; b : $t = 140$ jours

4.3. Discussions et comparaison avec les résultats du sol non-traité

4.3.1 *Evolution de la microstructure au cours des cycles d'humidification-séchage*

On discute d'abord dans cette partie des résultats obtenus sur l'évolution de la microstructure de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux au cours des deux cycles d'humidification-séchage dans la chambre environnementale. Les résultats des courbes de distribution des rayons d'accès de pores de sol dans la chambre environnementale sont ensuite utilisés pour établir les courbes de rétention d'eau de ce sol. Enfin, les résultats obtenus sur l'évolution de la microstructure du sol traité à la chaux durant les deux cycles d'humidification-séchage sont comparés avec ceux du sol non-traité à l'échelle de la chambre environnementale ainsi qu'à l'échelle de l'éprouvette.

Dans cette étude, pour le sol traité à la chaux à l'échelle de la chambre environnementale, l'humidification provoque l'augmentation du volume des pores inter-agrégats naturels et aucun changement dans la taille des pores intra-agrégat. Les rayons d'accès des pores inter-agrégats (naturels et compactés) après l'humidification des différentes couches de sol traité à la chaux dans la chambre sont centrés entre 2 à 4 μm et sont égaux à ceux du sol traité à la chaux obtenus après l'essai de gonflement libre (chapitre 1). En outre, bien que la taille des rayons d'accès de pores inter-agrégats ainsi que intra-agrégat ne change pas après deux phases d'humidification, le volume poreux de pores inter-agrégats après la deuxième phase d'humidification diminue relativement par rapport celui des pores intra-agrégat en comparant avec les résultats obtenus après la première phase d'humidification. Ceci peut être expliqué par le développement dans le temps des hydrates CSH qui remplissent les pores inter-agrégats du sol traité à la chaux. Ce phénomène dépend beaucoup du temps de cure du sol traité à la chaux : plus le temps est long, plus les hydrates se développent et remplissent les pores inter-agrégats (Locat et al. 1996 ; Onitsuka et al. 2001). Il faut noter que le sol prélevé pour l'étude de la microstructure après la deuxième phase d'humidification a passé 7 mois de cure dans la chambre environnementale. En comparaison avec le sol traité à la chaux après quatre phases d'humidification à l'échelle de l'éprouvette (chapitre 4), un phénomène similaire sur la microstructure du sol traité à la chaux a été également observé pour cet échantillon après 8 mois de cure.

Quant au séchage, il entraîne une diminution du volume des pores inter-agrégats naturels dans le sol traité à la chaux dans la chambre environnementale et il n'y a toujours pas de changement dans la taille des pores intra-agrégat. On observe que la taille moyennée des rayons d'accès des pores inter-agrégats (naturels et compactés) a augmenté de 3 μm (après la saturation) à 10 μm (après le séchage). Ce phénomène s'est produit dans toutes les couches du massif de sol dans la chambre environnementale après le premier et le deuxième séchage, sauf pour la couche de sol proche de la surface dont la famille de pores inter-agrégats (naturels et compactés) a été détruite après chaque séchage. Ceci montre que l'évaporation se produit principalement dans la couche située en surface, ce qui modifie aussi la microstructure du sol jusqu'au niveau -250 mm dans cet essai.

Afin de comparer ces résultats avec le comportement microstructural de l'argile d'Héricourt non-traitée à l'échelle de la chambre environnementale, des études de l'évolution microstructurale au cours des cycles d'humidification-séchage de ce sol sont également réalisées. Seuls les résultats de deux couches de sol non-traité sont présentés. On note que l'argile d'Héricourt non-traitée a été soumise aux deux cycles d'humidification-séchage dans la chambre environnementale similairement à celle traitée à la chaux dans cette étude (Song 2014).

Les Figures 5.35 et 5.36 présentent les courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt non-traitée prise aux deux niveaux 0-50 mm et -150-200 mm dans la chambre de environnementale après la première saturation, pour le premier séchage ainsi que pour le deuxième séchage. En général, on trouve que l'évolution microstructurale au cours des cycles d'humidification-séchage de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux est similaire à celle de l'argile d'Héricourt non-traitée. Sur l'argile d'Héricourt non-traitée, l'humidification entraîne également une augmentation du volume des pores inter-agrégats naturels et aucun changement dans la taille des pores intra-agrégat (Figures 5.35 et 5.36). Les rayons d'accès des pores inter-agrégats (moyenné pour les pores inter-agrégats naturels et compactés) après l'humidification des deux couches de sol non-traité dans la chambre sont centrés entre $1\text{ }\mu\text{m}$ et $2\text{ }\mu\text{m}$ (Figures 5.35b et 5.36b). Cette gamme de dimension de rayons d'accès de pores est inférieure à celle du sol traité à la chaux obtenue après la phase d'humidification (de $2\text{ }\mu\text{m}$ à $4\text{ }\mu\text{m}$), ce qui est en accord avec les résultats obtenus pour les sols après l'essai de gonflement libre à l'échelle de l'éprouvette (chapitre 1). Le séchage cause aussi une diminution de volume des pores inter-agrégats naturels dans le sol non-traité dans la chambre environnementale et il n'y a toujours pas de changement dans la taille des pores intra-agrégat (Figures 5.35 et 5.36). Comme dans le sol traité à la chaux, le volume des pores inter-agrégats naturels diminue à la fin du séchage et le volume des pores inter-agrégats compactés ne change pas, ce qui entraîne une diminution du volume poreux total du sol après le séchage. Pour l'échantillon de sol non-traité, au niveau -150-200 mm, la famille de pores inter-agrégats naturels centrée vers $1\text{ }\mu\text{m}$ est encore observée à la fin du deuxième séchage, ce qui montre que le phénomène d'évaporation s'est produit dans la chambre environnementale jusqu'au niveau -200 mm mais il a moins d'effet à ce niveau qu'aux niveaux proches de la surface.

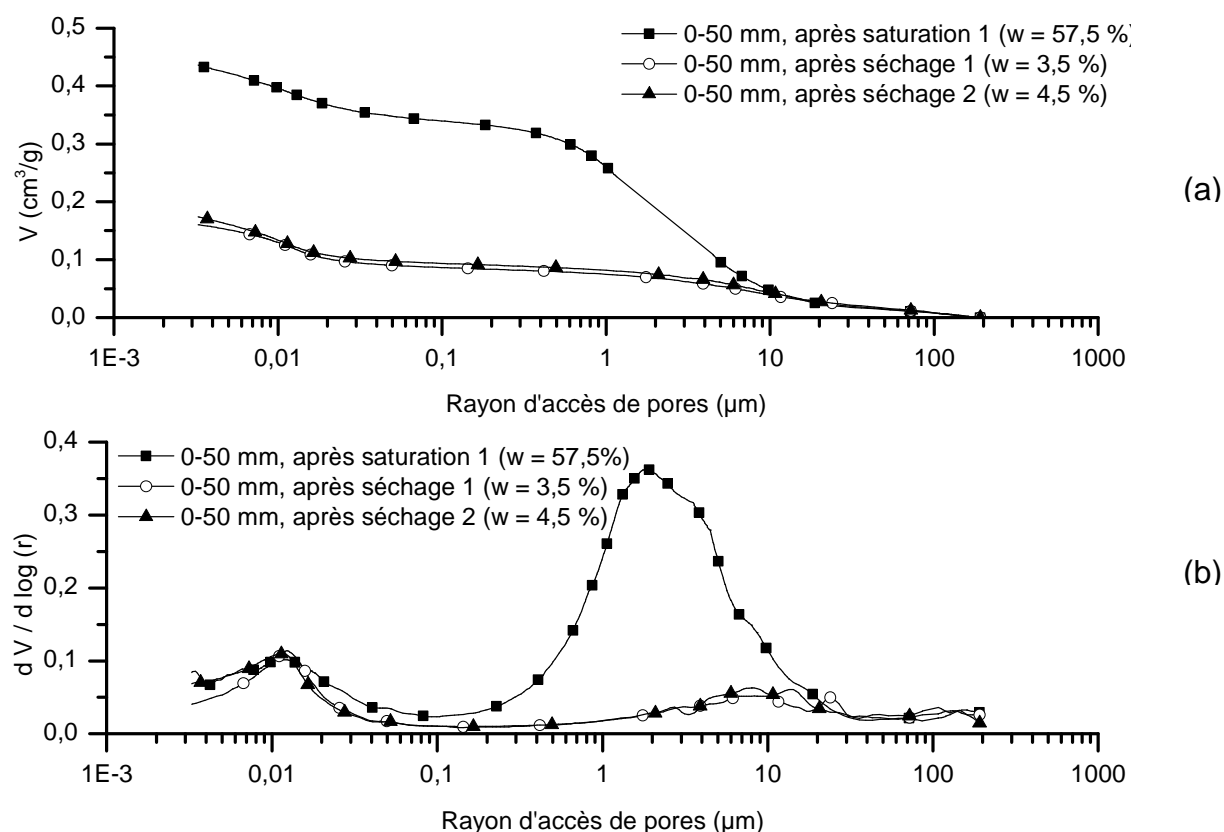


Figure 5.35 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt non-traitée au niveau 0-50 mm dans la chambre environnementale après la 1^e saturation, après le 1^e, puis le 2^e séchage

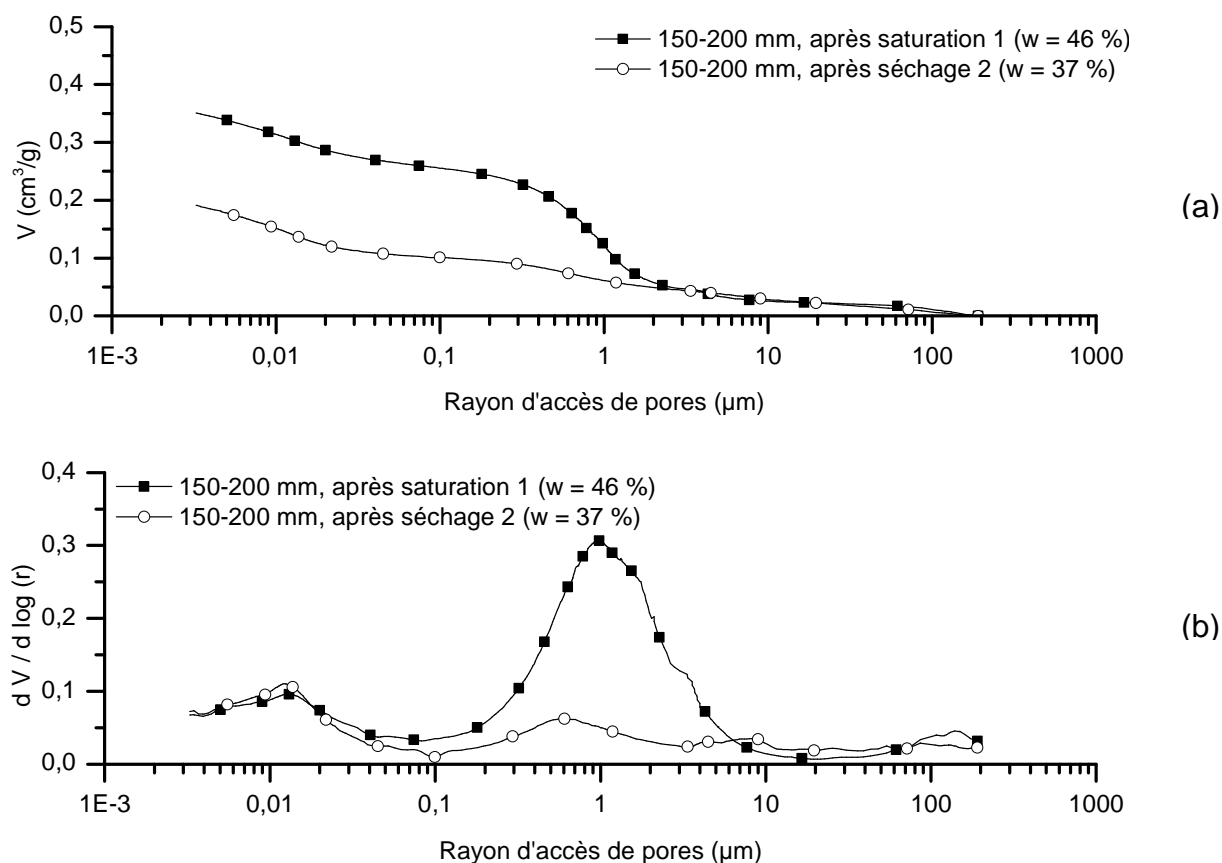


Figure 5.36 : Courbes cumulées (a) et de distribution des rayons d'accès de pores (b) de l'Argile d'Héricourt non-traitée au niveau -150-200 mm dans la chambre environnementale après la 1^e saturation et le 2^e séchage

La comparaison des deux sols non-traité et traité à la chaux montre que la variation de volume de ces sols au cours de l'humidification ou du séchage à l'échelle de la chambre environnementale est contrôlée principalement par la famille de pores inter-agrégats naturels. Les observations au MEB effectuées sur des échantillons des deux types de sol non-traité et traité à la chaux après la saturation montrent que l'humidification sépare des particules argileuses à partir des agrégats, la diminution de la taille des pores inter-agrégats (moyenné pour les pores inter-agrégats naturels et compactés) au cours de l'humidification pouvant être liée aux écartements des agrégats naturels à partir des agrégats compactés hydratés. Le séchage rétracte et rassemble les agrégats naturels pour former les grands agrégats compactés, la famille des pores inter-agrégats disparaît et le volume des pores diminue. En outre, pour le sol traité à la chaux, on observe le développement des hydrates dans le temps. Au début, ces hydrates résultent de la réaction entre la chaux vive et les minéraux argileux et prennent une forme réticulaire. Plus le temps augmente, plus le réseau de ces hydrates est dense et prend la forme de plaquettes.

Les courbes de volume poreux cumulé du sol traité à la chaux, pour les différents niveaux dans la chambre environnementale, après la première saturation puis la deuxième saturation, sont utilisées pour établir des courbes de rétention d'eau du sol. Les courbes porosimétriques sont exprimées en volume des vides injectés rapporté à la masse sèche du sol ($V_{\text{vides injectés}}/m_s$) en fonction de rayon d'accès (r). Donc, le degré de saturation S_r peut être déduit à partir du rapport : volume injecté mesuré / volume injecté total. Se basant sur la masse volumique des solides du sol et la porosité de chaque couche de sol, on peut convertir le degré de saturation

en teneur en eau volumique ($S_r = \theta/n$). Ces courbes de rétention d'eau sont présentées dans les Figures 5.37 et 5.38 et comparées avec celles obtenues par les mesures expérimentales de succion et de teneur en eau. On trouve que ces courbes sont en concordance avec les résultats expérimentaux.

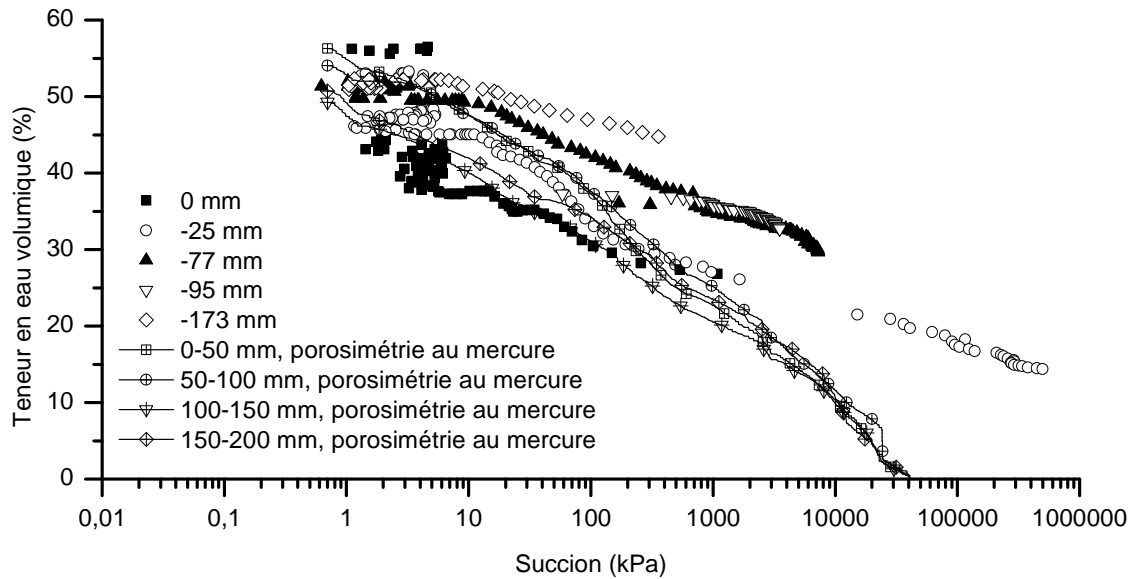


Figure 5.37 : Courbe de rétention d'eau obtenue par les courbes porosimétriques du sol traité à la chaux après la première phase d'humidification

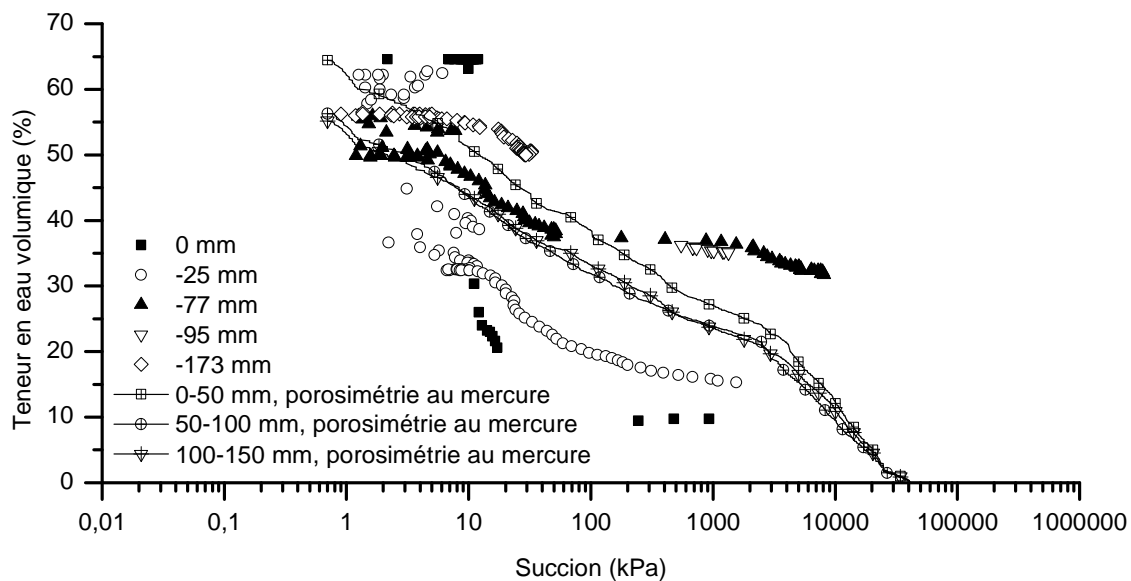


Figure 5.38 : Courbe de rétention d'eau obtenue par les courbes porosimétriques du sol traité à la chaux après la deuxième phase d'humidification

4.3.2 Fissuration

Par comparaison entre le sol traité à la chaux et le sol non-traité, on trouve que le comportement des deux types de sol vis-à-vis de la fissuration est totalement différent. Au cours du séchage, le sol traité à la chaux ne se rétracte pas et les fissures ne se développent pas à la surface du sol tandis que le sol non-traité rétrécit fortement et les fissures se

développent beaucoup en surface. La Figure 5.39 présente la surface du sol non-traité à la fin du premier séchage.

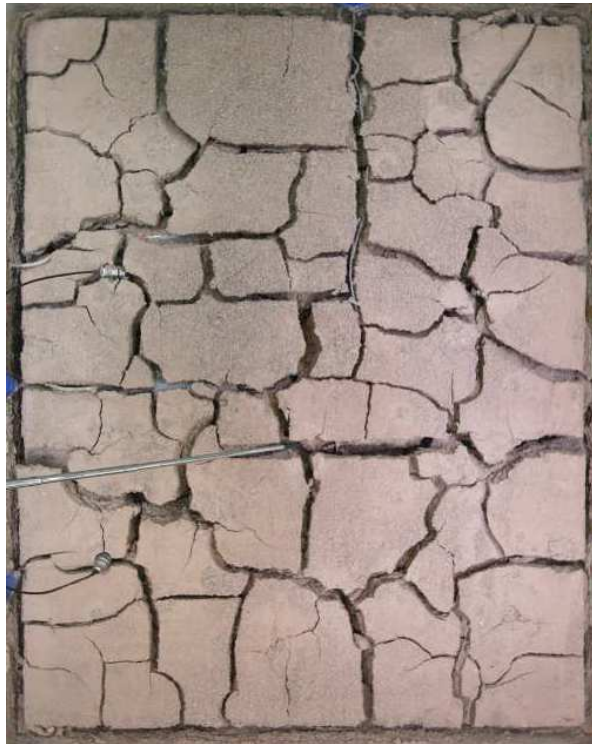


Figure 5.39 : Fissuration à la surface de l'argile d'Héricourt non-traitée à la fin du séchage 1 (Song 2014)

La fissuration est caractérisée par le taux de fissures qui représente le rapport entre la surface de fissures et la surface totale de sol. Après le traitement des images, Song (2014) a établi des relations entre ce taux de fissures et la teneur en eau ainsi que la succion à la surface du sol. Ces relations sont présentées sur les Figures 5.40 et 5.41. Sur ces figures, on peut déterminer deux phases de l'évolution de la fissuration dans l'argile d'Héricourt non-traitée ainsi que la valeur de teneur en eau et la valeur de succion au moment où la fissuration commence. On observe que la fissuration se développe à partir d'une teneur en eau ≤ 60 % et pour une valeur de succion ≥ 7 kPa. Il apparaît qu'à partir de cette valeur de teneur en eau, la succion du sol est non nulle et dépasse la résistance à la traction du sol, ainsi les fissures apparaissent. Par la suite, l'augmentation rapide de la succion à la surface du sol entraîne une croissance du taux de fissures. Ce phénomène est mis en évidence également par Miller et al. (1998), Yesiller et al. (2000) et Ta (2009). Enfin, la limite de retrait est atteinte ($\theta = 30$ %, Figure 5.40) et une diminution de teneur en eau ne provoque plus de diminution de volume du sol à la surface. Ainsi, le développement du réseau de fissures s'arrête ; le taux de fissures et la largeur pondérée se stabilisent. Des résultats similaires sur l'argile verte de Romainville sont aussi obtenus dans le travail de Ta (2009).

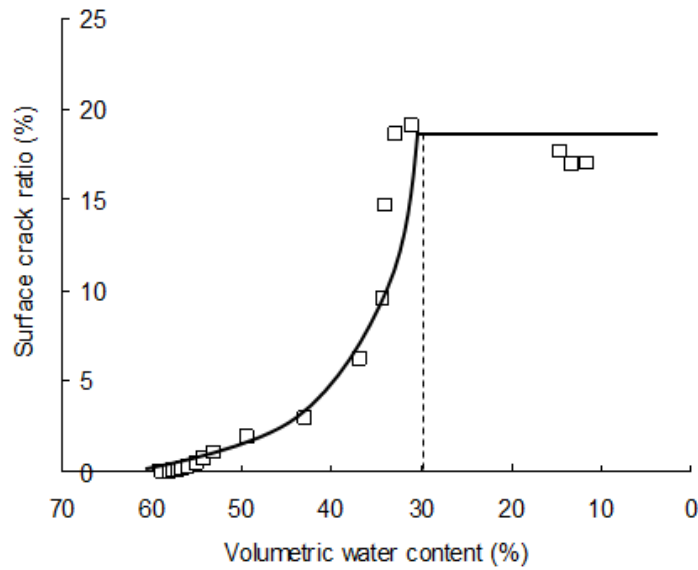


Figure 5.40 : Taux de fissures en fonction de la teneur en eau volumique (Song 2014)

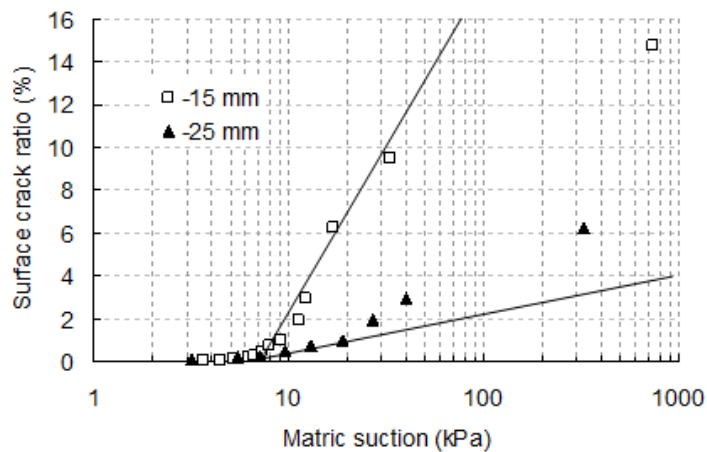


Figure 5.41 : Taux de fissures en fonction de la succion (Song 2014)

Après la comparaison du comportement à la fissuration et les études sur la microstructure des deux types de sol non-traité et traité à la chaux, on trouve que la différence de ces deux types de sol dans le comportement à la fissuration peut être expliqué par l'existence des hydrates créés par la réaction entre la chaux et les minéraux argileux en présence d'eau pour le sol traité à la chaux. Ces hydrates se développent dans les pores inter-agrégats et relient des agrégats argileux. Ils contribuent à la rigidification du squelette du sol, empêchant la création de fissures dans le sol.

5. Conclusions

Le processus de gonflement et de retrait d'un sol argileux traité à la chaux a été étudié à une échelle proche de l'échelle in-situ dans ce chapitre. L'évolution de la microstructure au cours de cycles d'humidification-séchage est aussi étudiée à cette échelle. Ces travaux ont eu pour objectifs : 1) de comparer les études à l'échelle de la chambre environnementale et à l'échelle

de l'éprouvette (chapitres précédents) ; et 2) de comparer les études des échantillons traités et non traités en chambre environnementale pour l'argile d'Héricourt (AH).

Pour étudier le comportement du sol à grande échelle, la chambre environnementale est choisie. Il s'agit d'un grand dispositif qui permet de réaliser des essais d'infiltration et d'évaporation sur un massif d'environ $0,2 \text{ m}^3$ d'argile d'Héricourt compactée et traitée à la chaux. Près de cinquante capteurs ont été employés permettant le suivi complet des paramètres du sol (la succion, la teneur en eau, l'humidité relative, la température, le gonflement de la surface, la fissuration) et de l'air (l'humidité relative, la température, la vitesse du vent). Avec cette chambre environnementale, on a réalisé une phase d'humidification suivie d'une phase de séchage. Deux cycles d'humidification-séchage ont été effectués afin d'étudier différents paramètres intervenant dans le processus d'humidification et d'évaporation.

La phase d'humidification a nécessité une période de 3 jours pour le premier cycle et de 15 jours pour la resaturation. Les résultats obtenus dans ces phases d'infiltration ont montré une bonne performance des capteurs utilisés et permettent de mieux comprendre le phénomène d'hydratation du sol traité à la chaux à l'échelle de la chambre environnementale. Cette hydratation a duré environ 3 jours et est égale à la durée d'hydratation à l'échelle de l'éprouvette. Un gonflement libre de 18 % s'est produit au cours de l'hydratation dans la chambre environnementale comme à l'échelle de l'éprouvette. Ce gonflement est expliqué par le phénomène d'hydratation avec l'effet de l'expansion de la chaux et de la hausse de température. Durant la première phase d'humidification, on a constaté un effet de bord important dans le gonflement du sol à la surface. En effet, le gonflement au milieu de la surface est plus important que celui aux bords. Concernant la microstructure du sol traité à la chaux à l'échelle de la chambre environnementale, comme à l'échelle de l'éprouvette, l'humidification provoque l'augmentation du volume des pores inter-agrégats naturels et en conséquence l'augmentation du volume total de pores. Aucun changement dans la taille des pores intra-agrégat n'est observé après deux phases d'humidification. En outre, le volume poreux des pores inter-agrégats (naturels et compactés) du sol diminue relativement dans le temps par rapport à celui des pores intra-agrégat à cause du développement dans le temps des hydrates (CSH) qui remplissent les pores inter-agrégats du sol traité à la chaux.

La phase de séchage est réalisée en imposant un flux d'air chaud à la surface du sol et en faisant varier le niveau d'eau dans la chambre environnementale. L'air imposé étant très sec à l'entrée, les séchages ont été intensifiés. La température dans la chambre environnementale a atteint 34°C pour une longue durée avec une vitesse du vent de l'ordre de $0,2 \text{ m/s}$. En utilisant les données des phases de séchage, la courbe de rétention d'eau et la conductivité hydraulique en fonction de la succion ont été déterminées. La conductivité hydraulique de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux est de 10^{-16} m/s pour une succion forte de 100 MPa et de 10^{-7} m/s pour une succion faible de 1 kPa . On a constaté une bonne concordance entre la courbe de rétention d'eau obtenue sur l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale et la courbe obtenue sur l'argile d'Héricourt traitée à la chaux à l'échelle de l'éprouvette. Cependant, l'effet d'échelle ou de profondeur est observé sur les courbes de rétention d'eau des deux séchages à l'échelle de la chambre environnementale, ce qui peut s'expliquer par un gonflement variable du sol à différentes profondeurs. Ces résultats ont permis de construire les courbes de rétention d'eau des couches de sol différentes dans la chambre environnementale. Quant à l'effet du séchage sur la microstructure du sol à l'échelle de la chambre environnementale, comme à l'échelle de l'éprouvette, le séchage entraîne une diminution du volume des pores inter-agrégats naturels dans le sol traité à la chaux sans changement de la taille des pores intra-agrégat. En outre, le séchage n'entraîne pas de retrait

dans le sol traité à la chaux et les fissures ne se développent pas à la surface du sol, contrairement à ce qui se passe dans le cas du sol non-traité et d'autres sols argileux. Ce phénomène est expliqué par l'existence d'hydrates créés par la réaction entre la chaux et les minéraux argileux en présence d'eau dans le sol traité à la chaux. Ces hydrates relient des agrégats argileux et contribuent à une rigidification du squelette du sol, empêchant la création de fissures dans le sol.

On renvoie aussi aux Tableaux III, IV et V en Conclusion générale et perspectives.

Chapitre 6 - *Analyse du phénomène d'évaporation dans la chambre environnementale*

1. Introduction

Dans le chapitre 5, les mesures effectuées durant les essais d'infiltration et d'évaporation dans la chambre environnementale ont été utilisées pour étudier le retrait-gonflement et l'évolution des profils hydriques de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux, soumise à des cycles d'humidification-séchage. Nous disposons, de ce fait, de nombreuses mesures qui permettent d'analyser en détail le phénomène d'évaporation dans la chambre environnementale. Nous avons jugé intéressant d'exploiter ces mesures et de les confronter à différents modèles visant à calculer les transferts d'eau d'un sol vers l'atmosphère.

Dans ce chapitre, les concepts d'évaporation et les processus d'évaporation sont d'abord présentés de façon théorique. Ensuite, différents modèles de la littérature permettant de prédire la quantité d'eau évaporée sont présentés et leur applicabilité est discutée pour le calcul de l'évaporation dans la chambre environnementale, en vue de rendre compte des mesures expérimentales existantes. Le modèle de bilan de vapeur d'eau est choisi pour calculer l'évaporation dans la chambre environnementale (Blight 1997 ; Cui et Zornberg 2008). Ce calcul est ensuite validé par la méthode de bilan d'eau dans la chambre environnementale. Un autre modèle, basé sur les mesures de succion à la surface du sol, est choisi pour calculer l'évaporation. L'analyse et la modélisation de ces phénomènes de transfert d'eau sol-atmosphère sont importantes. *En effet, il est vraisemblable que les microstructures des sols argileux contrôlent ces phénomènes, et tout spécialement leurs cinétiques.*

La prévision de l'évaporation est importante dans divers domaines comme dans l'agriculture (Qiu et al. 1998), certaines applications minières (Wilson 1990 ; Wilson et al. 1994 ; Yanful et Choo 1997), la géotechnique (Yang et Yanful 2002 ; Yanful et al. 2003). Par exemple, la connaissance de l'ampleur et de la variation des pertes d'eau par évaporation est nécessaire dans la planification et la gestion des ressources en eau, l'évaluation de l'efficacité de l'irrigation de projets agricoles, l'approvisionnement en eau, la conception de réservoirs, l'évaluation de techniques de drainage... Récemment, la problématique de la sécheresse qui cause des dégâts pour des maisons individuelles résulte d'une évaporation excessive et a fait augmenter la demande d'études du phénomène d'évaporation (Ta 2009 ; Hemmati 2009). Ces études approfondies sur le processus d'évaporation contribuent à la démarche de prévention du risque de sécheresse. L'étude du phénomène d'évaporation est donc importante.

Dans la littérature, il existe plusieurs dispositifs expérimentaux développés pour étudier le phénomène d'évaporation en laboratoire ainsi qu'in-situ comme le bac d'eau (Wilson et al. 1994 ; Wilson et al. 1997), un dispositif simple, ou des dispositifs plus développés comme le lysimètre (Penman 1948 ; Blight 1997), la chambre environnementale (van de Griend et Owe 1994 ; Aluwihare et Watanabe 2003), le système de wind-tunnel (Yamanaka et al. 1997 ; Wang 2006), la station météorologique (Blight 1997). La taille des échantillons de sol utilisés pour les études d'évaporation en laboratoire varie de couches extrêmement minces de moins de 1 mm (Wilson et al. 1997) à des couches plus épaisses de 20 mm d'épaisseur (Kondo et al. 1990), de 130 mm d'épaisseur (Kondo et al. 1992) ou même de 1000 mm d'épaisseur (Ta 2009). Les matériaux étudiés dans ces essais de séchage concernent souvent des sols grossiers

comme du sable (Wilson 1990 ; Wilson et al. 1994 ; Yamanaka et al. 1997 ; Aluwihare et Watanabe 2003), le limon (Kondo et al. 1992) ou moins étudié comme des argiles (Wilson et al. 1997 ; Ta 2009 ; Song 2014). L'étude expérimentale de l'évaporation sur un massif d'argile traitée à la chaux a rarement été réalisée en laboratoire.

2. Phénomène d'évaporation

2.1. Concepts d'évaporation

L'évaporation est un phénomène naturel par lequel l'eau liquide est changée en vapeur et transférée dans l'atmosphère à partir de la surface de l'eau, du sol ou des plantes (Figure 6.1). Le terme d'évaporation se réfère généralement à la surface de l'eau et la surface du sol nu tandis que le terme de transpiration est utilisé pour la surface des plantes (Wilson 1990 ; Hillel 2004). En outre, un autre terme, l'évapotranspiration, est également utilisé pour décrire la combinaison de l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration des plantes.

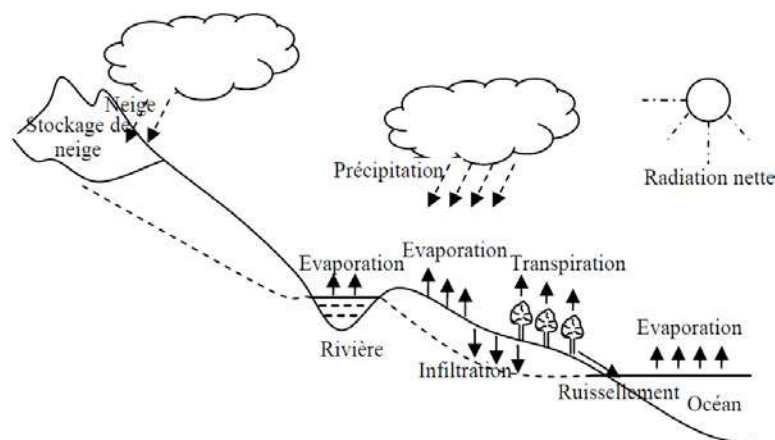


Figure 6.1 : Cycle de l'eau

Pour décrire la quantité d'eau évaporée, deux termes sont utilisés dans la bibliographie et également dans cette étude : l'évaporation potentielle (*PE*) et l'évaporation réelle (*AE*). L'évaporation potentielle est définie comme le taux d'évaporation maximale quand l'eau s'évapore à partir d'une surface d'eau pure, sous certaines conditions climatiques (Wilson et al. 1994). La mesure directe du taux d'évaporation à partir du sol est appelée taux réel d'évaporation.

2.2. Processus d'évaporation

Dans la nature, le phénomène d'évaporation à la surface du sol se produit s'il réunit les trois conditions suivantes : (1) une alimentation d'énergie continue (fournie par l'environnement ou le sol lui-même) ; (2) un gradient de pression de vapeur d'eau existant entre la surface d'évaporation et l'atmosphère, où la vapeur d'eau est évacuée par diffusion et/ou convection (le gradient de pression de vapeur d'eau conduit la vapeur à l'atmosphère, et le vent passant au-dessus de la surface d'évaporation accélère ce processus) ; (3) une alimentation d'eau continue de l'intérieur du sol à la surface d'évaporation (Hillel 2004 ; Lal et Shukla 2004).

En général, le processus d'évaporation comporte trois phases qui se distinguent par la valeur du taux d'évaporation (Figure 6.2) (Hillel 2004 ; Wilson et al. 1994 ; Yanful et Choo. 1997 ; Qiu et Ben-Asher 2010). L'ampleur et la durée de chaque phase sont contrôlées, soit par les

conditions atmosphériques, soit par les paramètres physiques du sol ou par les deux. Plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier l'effet de ces paramètres sur le taux d'évaporation. Le rôle des paramètres suivants a été étudié : vitesse du vent (Kondo et al. 1992 ; Yamanaka et al. 1997 ; Wang 2006), rayonnement net (Wang 2006), humidité relative et température de l'air (Kayyal 1995), microstructure du sol (van Bavel et Hillel 1976 ; Wilson 1990), conductivité hydraulique du sol (Wilson et al. 1994), position de la nappe phréatique et caractéristiques de drainage (Yang et Yaful 2002), fissuration (Adams et Hanks 1964 ; Ritchie et Adams 1974 ; Hillel 2004), teneur en eau du sol (Wilson 1990 ; Wilson et al. 1997 ; Yanful et Choo 1997 ; Ta 2009), succion du sol (Ta 2009).

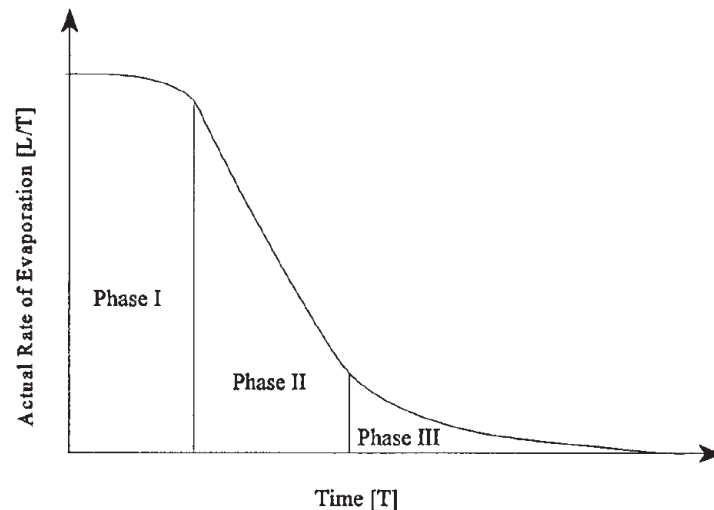


Figure 6.2 : Courbe classique montrant les trois phases d'évaporation dans un sol (Yanful et Choo, 1997)

L'évaporation à la surface d'un sol humide (saturé ou presque saturé) commence par la première phase avec un taux d'évaporation maximum ou taux d'évaporation potentielle. Ce taux d'évaporation est contrôlé par les conditions atmosphériques. Quand le transfert de l'eau dans le sol ne suffit pas pour maintenir le taux d'évaporation maximum, la deuxième phase se produit et l'évaporation diminue progressivement. Pendant cette phase, le taux d'évaporation est déterminé par la quantité d'eau qui peut être transférée à la surface d'évaporation. Les propriétés hydrauliques du sol jouent donc un rôle important dans la deuxième phase. La troisième phase apparaît lorsque la surface du sol est suffisamment sèche et le transfert d'eau liquide à travers cette couche de sol sec cesse. Pendant cette phase, l'évaporation du sol se produit dans la zone au-dessous de la couche de sol sec (ou légèrement humide) et la vapeur d'eau est diffusée vers l'atmosphère en traversant cette zone. Le taux d'évaporation de la troisième phase est donc contrôlé par la diffusion de vapeur d'eau au travers de la couche de sol sec (ou légèrement humide).

3. Modèles d'évaporation issus de la bibliographie

Dans la littérature, différents modèles pour prédire la quantité de l'eau évaporée ont été proposés, parmi lesquels les modèles de base (modèle de bilan d'eau, modèle de bilan d'énergie, modèle de résistance, modèle de transfert de masse) et d'autres modèles couplés. Dans cette partie, ces modèles sont examinés et leur applicabilité est discutée pour choisir des modèles adaptés au calcul de l'évaporation dans la chambre environnementale, capables de rendre compte des mesures expérimentales.

Pour cette revue bibliographique, nous prenons appui sur de précédents travaux (Ta 2009 ; Song 2014).

3.1. Modèles de base

Modèle de bilan d'eau :

Le premier modèle de base est le modèle de bilan d'eau qui paraît dans un premier temps comme le modèle le plus simple pour estimer le taux d'évaporation. La forme classique de ce modèle est exprimée par l'équation suivante (Blight 1997 ; Cui et Zornberg 2008) :

$$P - (I_{\text{int}} + R_{\text{off}}) = AE + I_{\text{inf}} \quad [6.1]$$

où P est la précipitation (mm/jour) ; I_{int} est l'interception de végétation (mm/jour) ; R_{off} est le ruissellement (mm/jour) ; AE est l'évaporation (mm/jour) ; et I_{inf} est l'eau infiltrée dans le sol (mm/jour).

Modèle de bilan d'énergie :

Le deuxième modèle de base pour estimer l'évaporation est le modèle de bilan d'énergie qui s'exprime par l'équation suivante (Brutsaert 1988 ; Blight 1997) (Figure 6.3) :

$$R_n = L_e + H + G \quad [6.2]$$

où R_n est le rayonnement net entrant à la surface du sol (W/m^2 ou $\text{J/m}^2\text{s}$), L_e est le flux de chaleur latente (positive pour l'évaporation de l'eau et négative pour la condensation de la vapeur) (J/kg), H est le flux de chaleur transmis dans l'air (positif lorsque l'énergie est utilisée pour chauffer l'air et négatif lorsque l'air perd de l'énergie due au refroidissement) (W/m^2 ou $\text{J/m}^2\text{s}$) et G est le flux de chaleur transmis dans le sol (positif lorsque l'énergie est transférée au sous-sol et négatif lorsque l'énergie est transférée à l'atmosphère) (W/m^2 ou $\text{J/m}^2\text{s}$).

Des équations pour calculer les composants du modèle de bilan d'énergie peuvent être trouvées en détail dans de Vries (1963) ; Brutsaert (1988) ; Blight (1997) ; Cui and Zornberg (2008) ; Cui et al. (2005 et 2010).

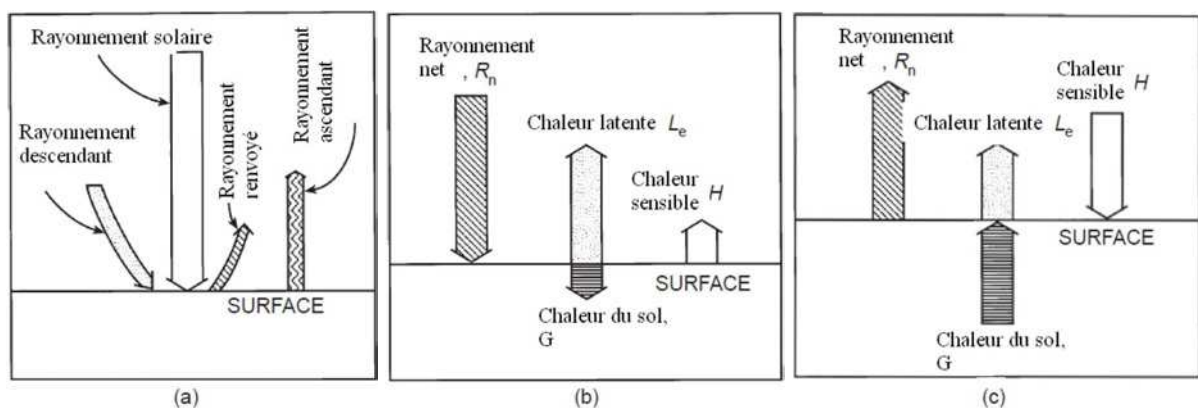


Figure 6.3 : Différents composants du bilan d'énergie : (a) bilan de rayonnement, (b) bilan d'énergie de jour et (c) bilan d'énergie de soir (d'après Tanner 1968 ; cité par Hillel 2004)

Modèle de résistances :

Le troisième modèle de base est le modèle de résistances qui est basé sur le fait que le flux de vapeur d'eau évaporée depuis la surface d'évaporation du sol est assimilé à un courant électrique. Le sol et l'atmosphère sont alors assimilés à des résistances. La Figure 6.4 présente le schéma de transfert de vapeur d'eau du modèle : la vapeur d'eau est d'abord transportée de la surface d'évaporation à la surface du sol par la diffusion moléculaire. Ensuite, elle est transférée de la surface du sol à l'atmosphère par un écoulement laminaire ou turbulent (Kondo et al. 1990 ; Aluwihare et Watanabe 2003). Pour assimiler ce mouvement de la vapeur d'eau au courant électrique, deux milieux où la vapeur d'eau passe sont alors considérés, avec une résistance du sol (r_s), et une résistance aérodynamique (r_a).

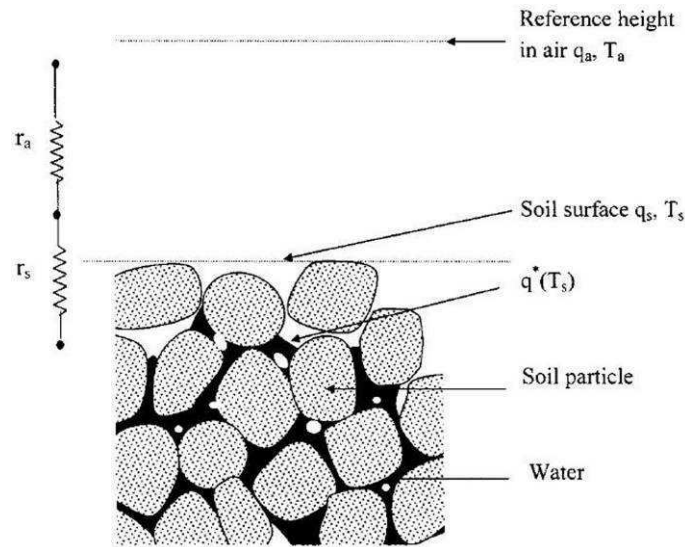


Figure 6.4 : Schéma de transfert de vapeur d'eau avec les résistances (Aluwihare et Watanabe 2003)

Selon le mode de transport de la vapeur d'eau dans le processus d'évaporation, deux modèles de résistances ont été proposés : modèle α [6.3] qui considère la diffusion de la vapeur d'eau depuis la surface du sol jusqu'à une hauteur de référence et modèle β [6.4] qui considère la vapeur d'eau transportée depuis la surface d'évaporation jusqu'à la hauteur de référence (Mahfouf et Noilhan 1991 ; Ye et Pielke 1993).

Modèle α :

$$AE = \frac{\rho_a}{r_a} [\alpha q_{sat}(T_s) - q_a] \quad [6.3]$$

où α est un coefficient représentant l'humidité relative à la surface du sol, fonction de la teneur en eau proche de la surface, q_{sat} est l'humidité spécifique saturante à la température de surface T_s (°C), q_a est l'humidité spécifique de l'air à la hauteur de référence et r_a est la résistance aérodynamique (s/m).

Modèle β :

$$AE = \frac{\rho_a}{r_a} \beta [q_{sat}(T_s) - q_a] \quad [6.4]$$

$$\beta = r_a / (r_a + r_s) \quad [6.5]$$

On note que dans le modèle β [6.4], T_s est la température de la surface d'évaporation, mais en pratique elle est remplacée par la température de surface du sol.

En outre, un autre modèle [6.6] plus compliqué est développé pour le cas où une couche de sol sec est formée et l'évaporation se produit au-dessous de cette couche de sol sec (van de Griend et Owe 1994 ; Yamanaka et al. 1997 ; Aluwihare et Watanabe 2003). Le schéma de ce modèle est présenté en Figure 6.5. La résistance du sol r_s est maintenant divisée en deux parties : la résistance de la couche de sol sec r_d et la résistance de diffusion r_{sw} .

$$AE = \rho_a \frac{q_{sat}(T_e) - h_a q_{sat}(T_a)}{r_{sw} + r_d + r_a} \quad [6.6]$$

$$r_d = z_d / (D_v \rho_a) \quad [6.7]$$

où $q_{sat}(T_e)$ est l'humidité spécifique saturante à la température de la surface d'évaporation T_e , h_a est l'humidité relative de l'air à la hauteur de référence, $q_{sat}(T_a)$ est l'humidité spécifique saturante à la température de l'air à la hauteur de référence T_a , D_v est la diffusivité moléculaire de vapeur d'eau dans l'air (m^2/s), z_d est la profondeur de la couche de sol sec (m).

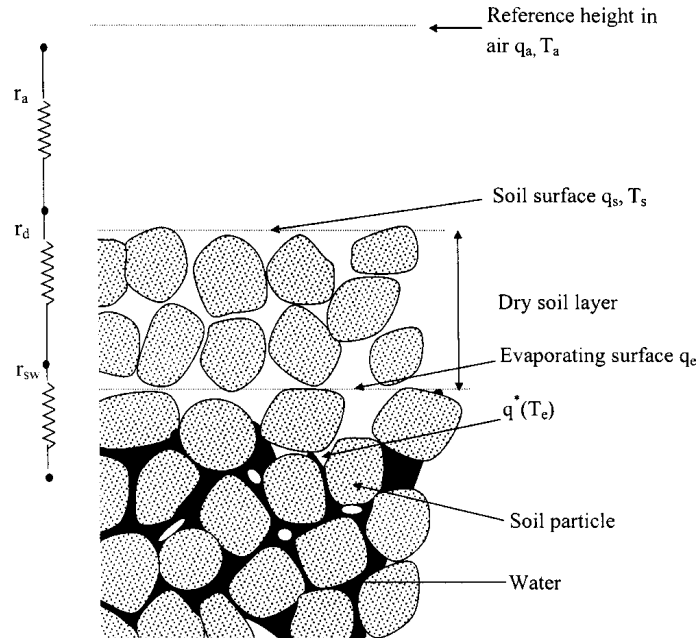


Figure 6.5 : Schéma des trois phases de transfert de la vapeur d'eau du sol vers l'atmosphère (Aluwihare et Watanabe 2003)

Modèle de transfert de masse :

Un autre modèle d'évaporation de base dans la littérature est le modèle de transfert de masse, décrit par l'équation de Dalton (Penman 1948). Il est souvent utilisé pour la prévision de l'évaporation à la surface de l'eau ou à la surface d'un sol humide en se basant sur le gradient de pression de vapeur d'eau, la température et la vitesse du vent sous la forme généralisée [6.8] ou la forme simple [6.9] :

$$AE = f(u)g(P)h(T) \quad [6.8]$$

où $f(u)$, $g(P)$ et $h(T)$ sont respectivement les fonctions de vitesse du vent, de pression de vapeur d'eau et de température.

$$AE = f(u)(P_{vs}^s - P_{va}) \quad [6.9]$$

où AE est l'évaporation, P_{vs}^s est la pression de vapeur d'eau saturante à la surface du sol, P_{va} est la pression de vapeur d'eau à la température correspondant à celle de l'air au-dessus, $f(u)$ est une fonction de la vitesse du vent.

Pour l'applicabilité des modèles de base présentés ci-dessus, la difficulté principale du modèle de bilan d'eau est que certaines variables du modèle ne sont pas faciles à mesurer comme l'eau infiltrée et le ruissellement (Singh 1989). En plus, les mesures de précipitation et de ruissellement pour des grandes surfaces peuvent produire de grandes erreurs dans le calcul de l'évaporation (Brutsaert 1988). Cependant, les modèles de ce type donnent des erreurs relativement petites et ils peuvent donc être utilisés s'il y a une installation lysimétrique permettant des mesures des paramètres du modèle, pour des surfaces limitées.

Pour le modèle de bilan d'énergie, ses composants ne sont pas non plus faciles à déterminer parce qu'ils dépendent de nombreux paramètres du sol ainsi que de l'atmosphère. Ce modèle est convenable uniquement pour les calculs dans les petites régions parce que l'évaluation du rayonnement net peut être très difficile (Singh et Xu 1997). Ce modèle est affecté par les caractéristiques de la distribution spatio-temporelle de l'énergie. En outre, la précision des capteurs de mesure de chaque composant du modèle ont également une influence importante sur les résultats de la mesure de l'évaporation. L'erreur de chaque mesure peut donc entraîner un résultat inacceptable du taux d'évaporation.

Les modèles de résistances montrent souvent une bonne performance pour une expérience spécifique. La détermination des résistances est essentielle pour ce type de modèle. Pour la résistance aérodynamique, elle n'est pas difficile à déterminer tandis que la résistance du sol est difficile à vérifier car différentes conditions de terrain (type de sol, profondeur du sol) contrôlent cette résistance. Par conséquent, une formule commune est difficile à établir, ce qui limite la généralisation de ce modèle.

Enfin, on observe que la forme du modèle de transfert de masse est simple et les variables de ce modèle sont faciles à mesurer. Ce type de modèle ne convient pas pour l'évaporation à partir du sol non saturé parce que les effets des paramètres du sol ne sont pas pris en compte. Cependant, pour l'évaporation à partir de la surface de l'eau et du sol saturé ou quasi saturé, ce modèle est applicable et permet de calculer l'évaporation maximum dans la chambre environnementale.

3.2. Modèles couplés

En se basant sur les modèles de base présentés ci-dessus, plusieurs modèles couplés ont été établis. Parmi ceux-ci le modèle de Penman [6.10] (Penman 1948) qui combine le modèle de bilan d'énergie avec le modèle de transfert de masse et le modèle de Penman-Monteith [6.11] (Monteith 1981) qui se base sur le modèle de bilan d'énergie et le modèle de résistances sont les plus utilisés.

Modèle de Penman :

$$AE_{penman} = \frac{(\Delta R_n + \gamma E_a)}{(\Delta + \gamma)} \quad [6.10]$$

Avec $E_a = 0.35(1+9.8 \times 10^{-3} u_2)(P_{va}^s - P_{va})$ et $\Delta = (P_{vs}^s - P_{va}^s)/(T_s - T_a)$

où AE_{penman} est le taux d'évaporation (mm/jour), u_2 est la vitesse du vent à 2 mètres au-dessus de la surface du sol (miles/jour), Δ est la pente de la courbe de la pression de vapeur d'eau saturante en fonction de la température de l'air T_a (mm de Hg/°C), R_n est le rayonnement net (mm d'eau/jour), P_{va}^s est la pression de vapeur d'eau saturante à la température de l'air à la hauteur de référence (mm de Hg), P_{va} est la pression de vapeur d'eau à la hauteur de référence (mm Hg), et γ est la constante psychrométrique (0,495 mm Hg/°C).

$$\text{Modèle de Penman-Monteith : } AE = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (P_{vs}^s - P_{va})/r_a}{[\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)]\rho_w L_e} \quad [6.11]$$

où AE est l'évapotranspiration ou l'évaporation, Δ est le même paramètre que dans le modèle de Penman, R_n est le rayonnement net, G est le flux de chaleur dans le sol, ρ_a est la masse volumique de l'air, c_p est la chaleur spécifique de l'air, P_{vs}^s est la pression de vapeur d'eau saturante à la surface du sol, P_{va} est la pression de vapeur d'eau de l'air, r_a est la résistance aérodynamique, γ est la constante psychrométrique, r_s est la résistance de la surface du sol ou de la surface des feuilles ou du couvert végétal, ρ_w est la masse volumique de l'eau et L_e est la chaleur latente de vaporisation.

Les deux modèles couplés présentés ci-dessus se basent sur le modèle de bilan d'énergie et ont donc besoin des données météorologiques classiques comme le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. En outre, le modèle de Penman est considéré comme un cas particulier lorsque l'humidité relative de la surface du sol est égale à 100 %. Il est donc adapté pour estimer l'évaporation potentielle à la surface de l'eau et des sols saturés mais la surestime dans le cas des sols non saturés (Wilson 1990 ; Wilson et al. 1994). Comme dans le modèle de résistances, le modèle de Penman-Monteith a besoin de la détermination de la résistance du sol qui n'est pas toujours facile.

Un autre modèle permettant d'estimer le taux d'évaporation réel, en supposant que le taux d'évaporation potentiel est connu, est également très utilisé (Wilson et al. 1997) :

$$\frac{AE}{PE} = \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} \quad [6.12]$$

où AE est le taux d'évaporation réel, PE est le taux d'évaporation potentiel, h_s est l'humidité relative à la surface du sol et h_a est l'humidité relative de l'air à la hauteur de référence.

L'humidité relative à la surface du sol h_s est une fonction de la succion suivant la loi de Kelvin:

$$h_s = \exp \left[-s \frac{M(1/\rho_w)}{RT_s} \right] \quad [6.13]$$

où s est la succion à la surface du sol (kPa), M est la masse moléculaire de l'eau (18,016 kg/kmol), ρ_w est la masse volumique de l'eau (kg/m³), R est la constante universelle (8,31432 J/mol⁻¹ K⁻¹) et T_s est la température à la surface du sol (K).

En combinant l'équation [6.12] et l'équation [6.13], on obtient un modèle en fonction de la succion (Wilson et al. 1997) :

$$\frac{AE}{PE} = \frac{\exp\left(-s \frac{M(1/\rho_w)}{RT_s}\right) - h_a}{1 - h_a} \quad [6.14]$$

La formule [6.14] a été utilisée pour calculer l'évaporation dans les essais d'évaporation sur des couches de trois types de sol (Wilson et al. 1997) : voir courbe de la Figure 6.6. On trouve que cette courbe est en bon accord avec les valeurs mesurées pour les trois sols présentés, ce qui indique la pertinence de ce modèle. On note que dans ces calculs, le modèle de transfert de masse a été utilisé pour calculer l'évaporation potentielle (PE).

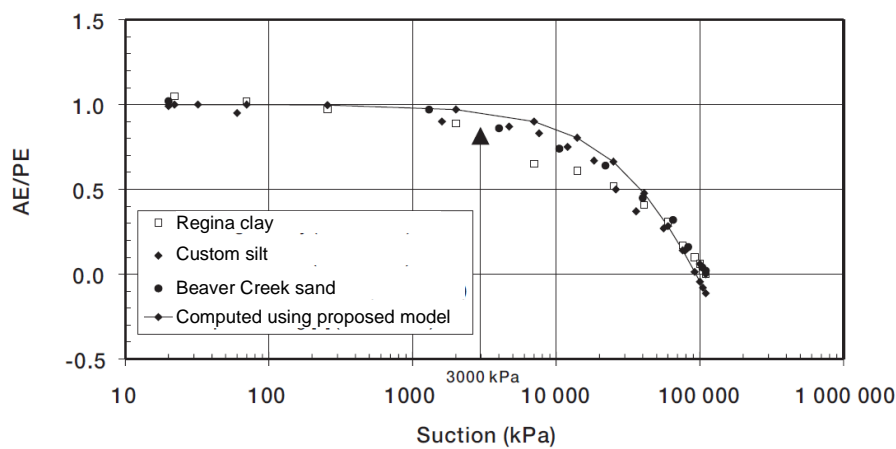


Figure 6.6 : Relation entre AE/PE et la succion (Wilson et al. 1997)

Pour ce type de modèle, la détermination de la succion à la surface du sol est essentielle. En outre, il faut un modèle fiable pour calculer l'évaporation potentielle. On note que ce modèle proposé par Wilson et al. (1997) est basé sur l'étude de l'évaporation de couches de sols très minces (moins d'un millimètre), les effets du sol plus en profondeur ne sont pas considérés. Par conséquent, ce type de modèle n'arrive pas à prédire le taux d'évaporation au cours de la troisième phase d'évaporation pendant laquelle l'évaporation du sol se produit dans une zone plus profonde.

Parmi les modèles couplés présentés, les modèles utilisant la succion du sol donnent une autre direction pour estimer l'évaporation du sol. Dans ces modèles, l'effet du sol et l'effet des paramètres atmosphériques sont clairement représentés. En plus, les paramètres utilisés sont très simples. La seule difficulté pour ces modèles est la mesure de la succion de la surface du sol qui a été suivie dans la chambre environnementale.

4. Application des modèles d'évaporation dans la chambre environnementale

4.1. Exploitation des mesures pour le calcul du taux d'évaporation dans la chambre environnementale

Dans cette partie, les mesures des paramètres dans la chambre environnementale sont exploitées pour étudier le taux d'évaporation (AE) et l'évaporation cumulée (CAE).

Grâce aux mesures des paramètres de l'air à l'entrée et à la sortie de la chambre environnementale, le taux d'évaporation est calculé directement par la méthode du bilan de vapeur d'eau. Le principe de cette méthode est que la différence entre la quantité de vapeur d'eau à l'entrée et à la sortie de la chambre est attribuée à la quantité d'eau évaporée par le sol dans la chambre environnementale. Les mesures de la température, de l'humidité relative à l'entrée et à la sortie ainsi que de débit d'air fourni dans la chambre sont utilisées pour déterminer le taux d'évaporation.

En se basant sur le principe ci-dessus, le taux d'évaporation dans la chambre est calculé par l'équation suivante :

$$AE = \frac{86400q(\rho_{v_sortie} - \rho_{v_entrée})}{\rho_w A} \quad [6.15]$$

où AE est le taux d'évaporation (mm/jour), ρ_{v_sortie} est l'humidité absolue de l'air à la sortie (Mg/m^3), $\rho_{v_entrée}$ est l'humidité absolue de l'air à l'entrée (Mg/m^3), q est le débit d'air (L/s), ρ_w est la masse volumique de l'eau (Mg/m^3), et A est la surface du sol dans la chambre environnementale (m^2).

L'humidité absolue de l'air (ρ_v) est calculée selon l'équation [6.16] :

$$\rho_v = \frac{0,622P_v}{1000RT_a} \quad [6.16]$$

où P_v est la pression de vapeur d'eau (Pa), T_a est la température de l'air (K), R est la constante des gaz parfaits ($287,04 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), 0,622 est le rapport entre les masses moléculaires de l'eau et de l'air sec.

La pression de vapeur d'eau P_v est déterminée selon l'équation [6.17] :

$$P_v = \frac{hP_v^s}{100} \quad [6.17]$$

où P_v^s est la pression de vapeur d'eau saturante (Pa), h est l'humidité relative (%).

La pression de vapeur d'eau saturante est obtenue par l'équation [6.18] (Brutsaert 1988) :

$$P_v^s = 101325 \cdot \exp(13,3185t_R - 1,9760t_R^2 - 0,6445t_R^3 - 0,1299t_R^4) \quad [6.18]$$

avec P_v^s en Pa ; $t_R = 1 - (373,15/T)$; T en °K.

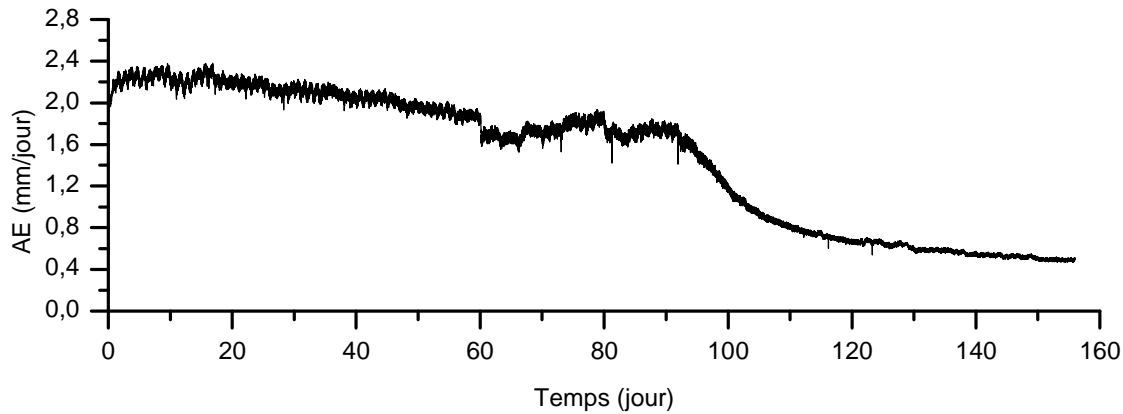


Figure 6.7 : Taux d'évaporation mesuré lors du séchage 1

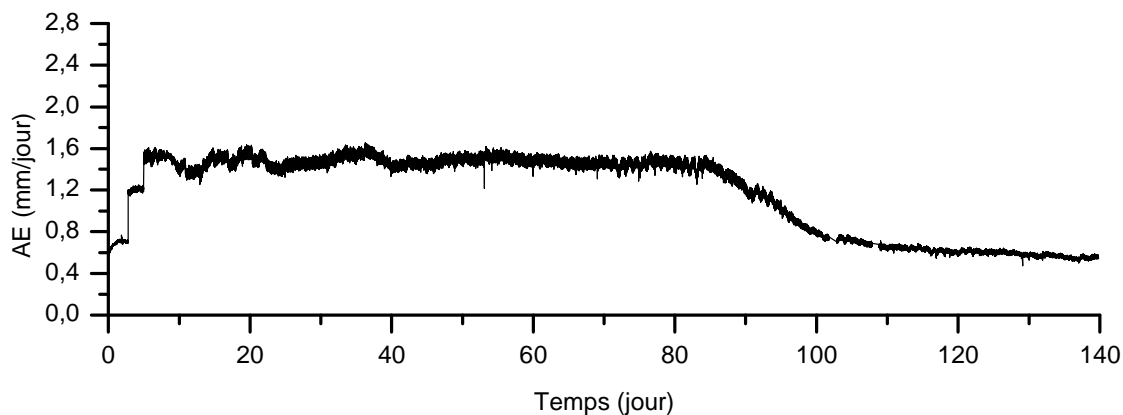


Figure 6.8 : Taux d'évaporation mesuré lors du séchage 2

On observe sur la Figure 6.7 que le taux d'évaporation lors du séchage 1 présente dans son ensemble une diminution continue de 2,25 ($t = 0$) à 0,50 mm/jour ($t = 156$ jours). En fait, cette diminution peut se diviser en trois phases. Dans la première phase, de $t = 0$ à $t = 91$ jours, deux plateaux de taux d'évaporation d'environ 2,00 mm/jour et d'environ 1,7 mm/jour, correspondant aux deux débits d'air différents, sont observés. Cette phase est suivie d'une diminution rapide pendant 14 jours (de $t = 91$ à $t = 105$ jours) où le taux AE passe à 0,5 mm/jour. Cette valeur se stabilise pour les derniers jours. Il semble que les trois phases du taux d'évaporation correspondent aux trois phases d'humidité relative dans la chambre environnementale (Figure 5.7b). On remarque que les deux dernières phases qui sont la phase de diminution et la phase de taux d'évaporation faible à 0,5 mm/jour se passent seulement dans la période où le niveau d'eau dans le réservoir se trouve à 2 cm au-dessus du fond du massif de sol.

Sur la Figure 6.8, on trouve aussi que l'évolution du taux d'évaporation lors du séchage 2 se décompose en trois phases. Dans la première phase, de $t = 0$ à $t = 84$ jours, trois plateaux de taux d'évaporation 0,7 mm/jour, 1,2 mm/jour et 1,5 mm/jour, correspondant aux trois débits d'air différents, sont observés. Cette phase est aussi suivie d'une diminution rapide pendant 18 jours (de $t = 84$ à $t = 102$ jours) où le taux AE passe à 0,5 mm/jour. Cette valeur se stabilise dans la troisième phase. Les trois phases du taux d'évaporation correspondent également aux trois phases d'humidité relative dans la chambre environnementale (Figure 5.11b). Les deux dernières phases se passent aussi seulement dans la période où le niveau d'eau dans le réservoir se trouve à 2 cm au-dessus du fond du massif de sol.

En comparant la durée des phases dans le processus d'évaporation au cours des séchages, on trouve que la durée des trois phases d'évaporation lors du séchage 2 est plus longue que la durée des trois phases d'évaporation correspondantes lors du séchage 1 (Figure 6.7 et Figure 6.8). Ceci peut être expliqué par le fait que le débit d'air fourni lors du séchage 2 est moins important que celui fourni lors du séchage 1. En fait, le débit d'air pour le séchage 1 est d'environ 110 L/min et de 95 L/min pour le séchage 2. La première phase du séchage 2 a duré 45 jours tandis que celle du séchage 1 a duré 26 jours. Pour la deuxième phase, cette durée est de 18 jours pour le séchage 2 et de 14 jours pour le séchage 1. Il faut noter que cette comparaison est comptée à partir du moment où le niveau d'eau au fond du massif de sol est imposé. En plus, on trouve que le taux d'évaporation des deux séchages est le même (0,5 mm/jour) pour la troisième phase lors des deux séchages. Pour comparer avec le travail de Song (2014) sur l'argile d'Héricourt non-traitée, les durées des deux phases d'évaporation sont d'environ 16 jours et de 9 jours pour la première phase et la deuxième phase respectivement et correspondent à un débit d'air de 155 L/min. Le débit d'air joue donc un rôle important dans la durée de chaque phase du processus d'évaporation. En outre, cette forte dépendance est également mise en évidence dans l'évaporation à partir de l'eau en surface. En effet, le taux d'évaporation AE dans la chambre environnementale lorsque l'eau est présente encore à la surface du sol est pratiquement en relation linéaire avec le débit d'air (Figure 6.9). Cette relation linéaire est aussi observée dans le travail de Ta (2009) et de Song (2014).

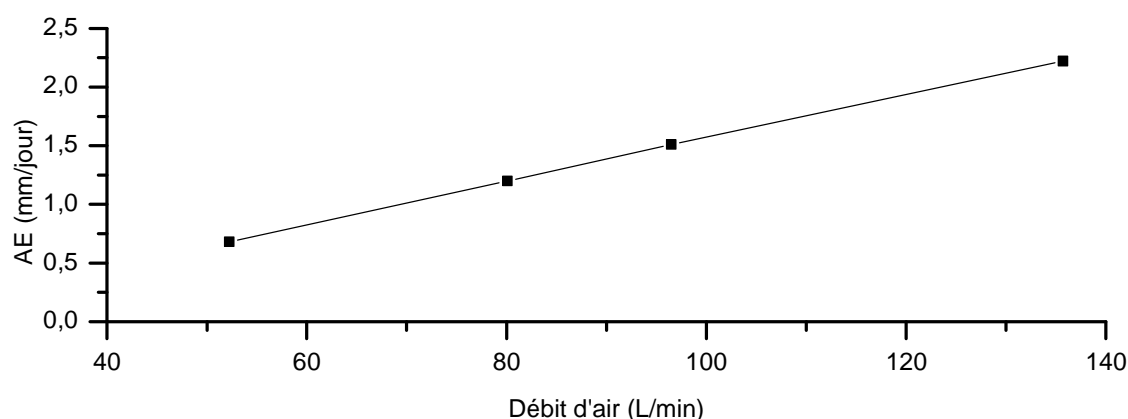


Figure 6.9 : Relation entre AE et le débit d'air

Grâce aux résultats du taux d'évaporation dans les Figures 6.7 et 6.8, la quantité d'eau évaporée cumulée (CAE) lors du séchage 1 et lors du séchage 2 est calculée et présentée dans les Figures 6.10 et 6.11.

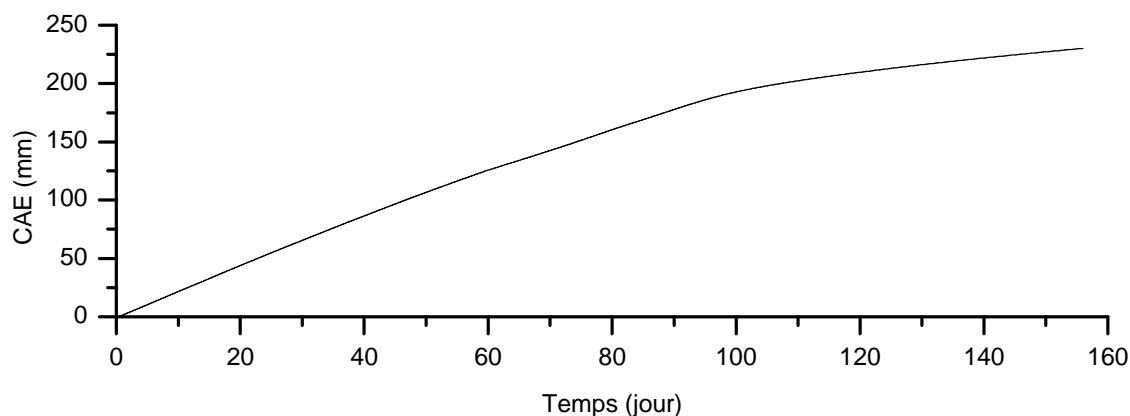


Figure 6.10 : Evaporation cumulée lors du séchage 1

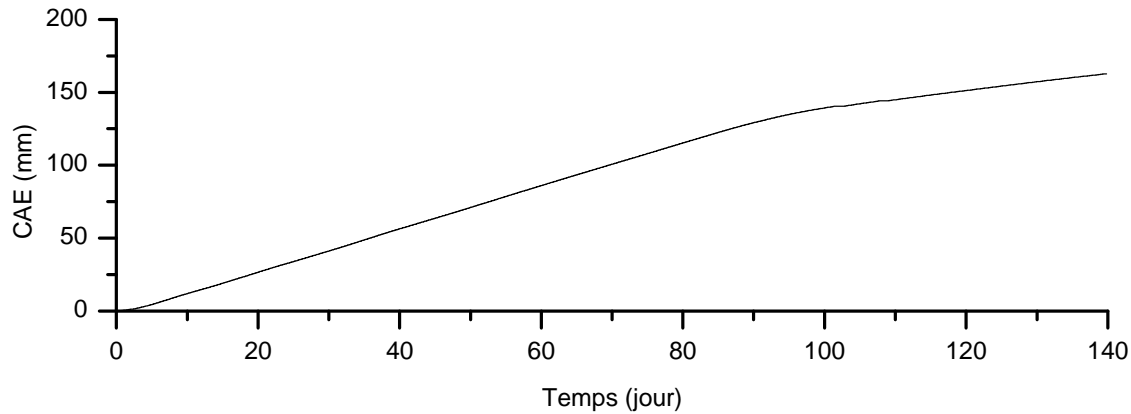


Figure 6.11 : Evaporation cumulée lors du séchage 2

Une légère diminution de pente de la courbe d'évaporation cumulée peut être observée vers $t = 91$ jours pour le séchage 1 (Figure 6.10) et $t = 84$ jours pour le séchage 2 (Figure 6.11), ce qui correspond au début de la phase de diminution du taux d'évaporation pour chaque séchage. Au total, une épaisseur de 230 mm d'eau et de 163 mm d'eau est évaporée en 156 jours et 140 jours pour le séchage 1 et le séchage 2 respectivement.

Afin de vérifier les résultats de calcul du taux d'évaporation obtenus par la méthode de bilan de vapeur d'eau dans la chambre environnementale, une autre méthode de calcul d'évaporation cumulée qui se base sur le bilan d'eau est également utilisée. Le profil de teneur en eau est utilisé dans cette méthode. On utilise ce profil pour déterminer la quantité d'eau sortante ($Q_{sortante}$) du massif de sol dans la chambre environnementale, comme dans la présentation du calcul de conductivité hydraulique basé sur la méthode des profils instantanés. La quantité d'eau évaporée est la somme de cette quantité ($Q_{sortante}$) et de la quantité d'eau ajoutée ($Q_{ajoutée}$) dans le réservoir pour maintenir le niveau d'eau constant, enregistrée au cours de chaque séchage. Ce résultat est ensuite comparé avec l'évaporation cumulée calculée (CAE) par la première méthode dans les Figures 6.12 et 6.13.

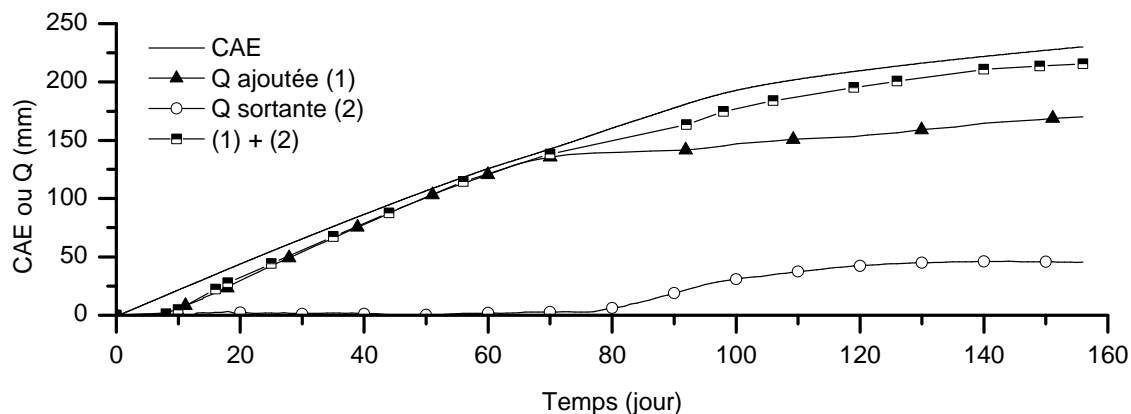


Figure 6.12 : Comparaison de CAE lors du séchage 1

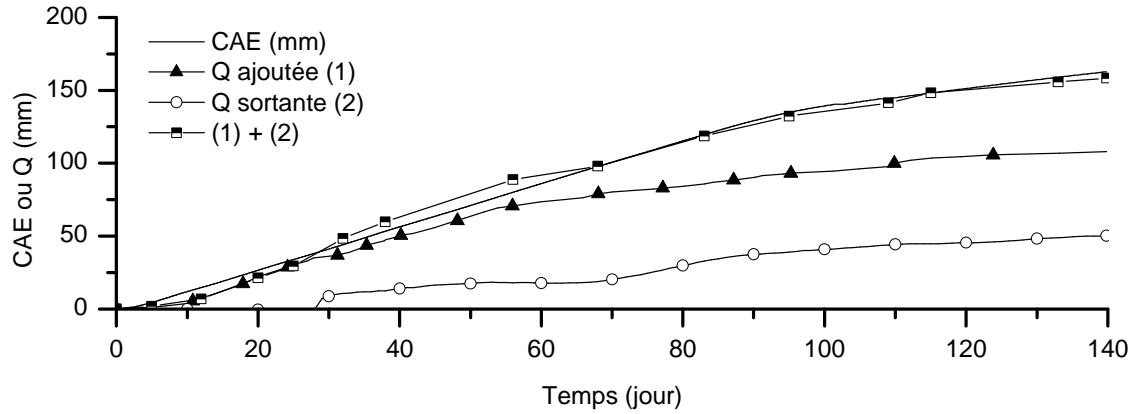


Figure 6.13 : Comparaison de *CAE* lors du séchage 2

La comparaison des résultats de *CAE* calculés par les deux méthodes présentées sur les Figures 6.12 et 6.13 montre un ordre de grandeur de *CAE* très voisin entre ces deux résultats ainsi qu'une tendance similaire entre les deux courbes. En effet, lors du séchage 1, la quantité d'eau cumulée estimée par la deuxième méthode est légèrement inférieure à celle obtenue par la première méthode (14 mm de moins ou 6 %) (Figure 6.12). Pour le séchage 2, cette différence est seulement de 4 mm ou 2 % (Figure 6.13). Ceci valide le calcul de l'évaporation cumulée par la première méthode, méthode de bilan de vapeur d'eau, et valide aussi le fonctionnement des dispositifs expérimentaux de mesure des paramètres dans le sol et dans l'air.

4.2. Application des modèles pour l'estimation du taux d'évaporation dans la chambre environnementale

D'après les présentations des modèles d'évaporation issus de la bibliographie, le modèle couplé [6.14] qui utilise la succion à la surface du sol pour estimer l'évaporation est apparu très pertinent par rapport aux autres modèles. En effet, ce modèle tient compte de l'effet du sol ainsi que de l'air dans l'évaporation, nécessitant des paramètres classiques comme l'humidité relative de l'air, la température de l'air et à la surface du sol, paramètres qui sont mesurés au cours des essais d'évaporation dans la chambre environnementale. En particulier, la succion à la surface du sol, qui est un paramètre très important de ce modèle, est mesurée durant l'évaporation dans la chambre environnementale. Le modèle [6.14] proposé par Wilson et al. (1997) est donc choisi pour calculer l'évaporation. Les résultats obtenus sont comparés à ceux calculés par le bilan de vapeur d'eau dans la section précédente.

$$\frac{AE}{PE} = \frac{\exp\left(-s \frac{Mg}{RT_s}\right) - h_a}{1 - h_a} \quad [6.14]$$

Comme déjà discuté, l'estimation du taux d'évaporation réelle par le modèle ci-dessus nécessite une équation pour calculer l'évaporation potentielle. Un modèle pour estimer l'évaporation potentielle doit alors être construit. Plusieurs formules de calcul du taux d'évaporation potentielle existent dans la littérature mais aucune n'est universelle et un calage spécifique est en général nécessaire. La formule suivante est choisie pour le calcul de l'évaporation potentielle dans la chambre environnementale :

$$PE = f(u) (100 - h_a) \quad [6.19]$$

Il faut noter que beaucoup de formules de calcul d'évaporation potentielle introduisent aussi l'effet de la température de l'air mais une bonne estimation du taux d'évaporation potentielle, dans le cas de différentes températures, peut être obtenue sans introduction de termes supplémentaires liés à la température (Ta 2009). L'utilisation du terme $(100 - h_a)$ considère implicitement l'effet de la température sur PE et donc permet de simplifier la formule en ne prenant pas en compte un paramètre de température de façon explicite.

Les données expérimentales issues de la chambre environnementale, comme la vitesse du vent et l'humidité relative de l'air, sont d'abord utilisées pour caler le paramètre $f(u)$ dans la formule [6.19]. Les Figures 6.14 et 6.15 présentent l'évolution de la vitesse du vent au cours des séchages. On note que cette vitesse du vent est mesurée à 0,05 m au-dessus de la surface du sol dans la chambre environnementale. On trouve que la vitesse du vent au cours du séchage 1 est plus élevée que la vitesse du vent au cours du séchage 2. Ceci est en accord avec un débit d'air plus élevé lors du séchage 1, en sachant que la section de passage dans la chambre est la même pour les deux séchages. En outre, les valeurs de vitesse du vent mesurées dans la chambre environnementale fluctuent au cours des deux séchages. Plus le vent est fort, plus ces valeurs fluctuent.

Il faut noter que la vitesse du vent peut être déduite à partir du débit d'air en connaissant la section de la chambre environnementale :

$$u = \frac{q}{A} \quad [6.20]$$

où u est la vitesse du vent (m/s), q est le débit d'air (m^3/s), A est la section de la chambre environnementale ($A = 0,8 \times 0,6 \text{ m}^2$).

Considérons le séchage 1 comme un exemple pour obtenir la vitesse du vent. Le débit d'air moyen durant les 10 premiers jours du séchage 1 est de 135 L/min ou de $2,25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Avec la section connue A , la vitesse du vent vaut $6,25 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. En sachant que cette vitesse déduite est la vitesse ($u_{0,225}$) au niveau du distributeur d'air qui se trouve à 0,225 m au dessus de la surface du sol. Pour calculer approximativement la vitesse du vent au niveau 0,05 m au-dessus de la surface du sol ($u_{0,05}$), un profil logarithmique des vitesses du vent est utilisé :

$$u_{0,05} = u_{0,225} \frac{\ln\left(\frac{0,05}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{0,225}{z_0}\right)} \quad [6.21]$$

En prenant $z_0 = 0,03 \text{ (m)}$ qui est la longueur de rugosité de la surface de sol dans la chambre environnementale, on a la vitesse du vent au niveau 0,05 m : $u_{0,05} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, valeur beaucoup moins importante que celle mesurée (Figure 6.14). Ceci confirme la nécessité de la mesure de la vitesse du vent dans la chambre environnementale pour cette étude.

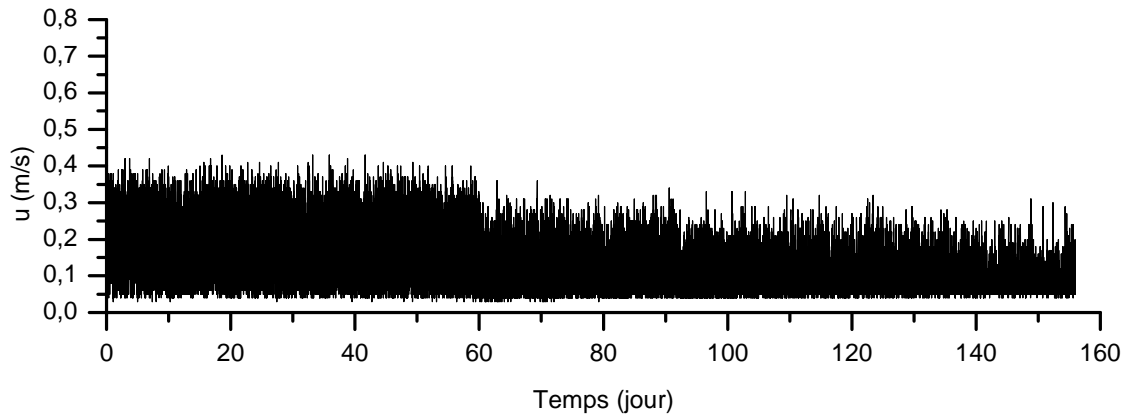


Figure 6.14 : Evolution de la vitesse du vent au cours du séchage 1

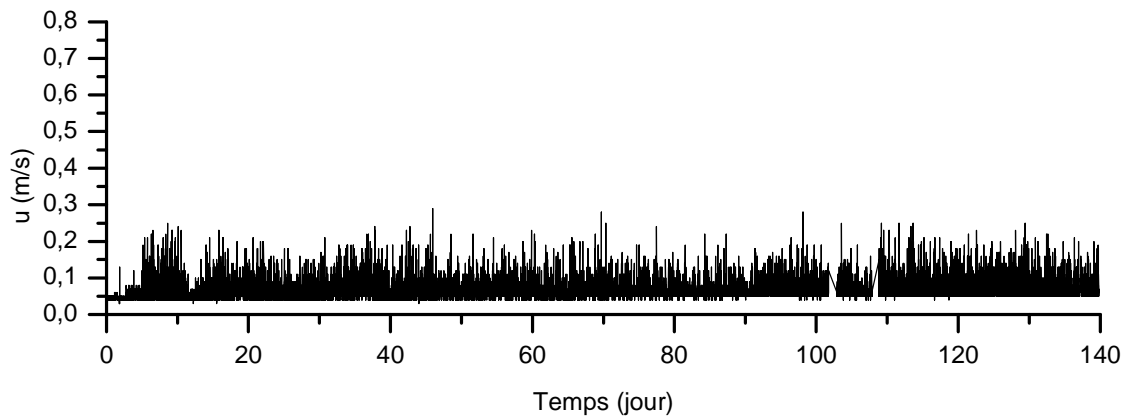


Figure 6.15 : Evolution de la vitesse du vent au cours du séchage 2

La méthode de calage de $f(u)$ est la suivante : on utilise les données des séchages avec une vitesse du vent du séchage 1 et trois autres valeurs issues du séchage 2 pour déterminer les paramètres liés au vent. La calibration des paramètres de $f(u)$ dans la formule [6.19] est réalisée et présentée dans la Figure 6.16. On observe une relation logarithmique et cette relation permet de déterminer $f(u) = 0,0693 + 0,0163\ln(u)$.

Avec $f(u)$ déterminé par la calibration de la Figure 6.16, on peut obtenir la formule suivante de calcul d'évaporation potentielle dans la chambre environnementale :

$$PE = (0,0693 + 0,0163\ln(u))(1 - h_a) \quad [6.22]$$

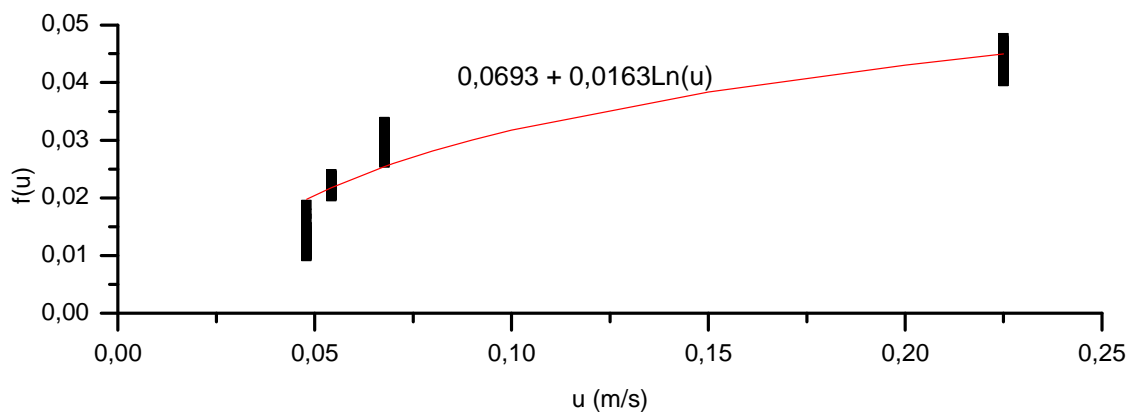


Figure 6.16 : Calibration des paramètres de la formule [6.19]

Pour vérifier la qualité du calage, le taux d'évaporation potentielle (PE) est calculé par la formule [6.22] pour les deux séchages et ensuite comparé à celui mesuré. Ces résultats sont présentés sur les Figures 6.17 et 6.18, ensemble avec le taux PE mesuré. On note que seuls les résultats sur les dix premiers jours de chaque séchage durant lesquels l'eau reste encore sur la surface du sol sont présentés dans les figures. On observe une bonne concordance entre le taux PE calculé par la formule [6.22] et le taux PE mesuré lors du séchage 1 et lors du séchage 2, sauf dans le cas de vitesse du vent faible. Pour une vitesse du vent inférieure à 0,05 m/s, il existe un écart de 25 % entre le taux PE calculé par la formule [6.22] et le taux PE mesuré. Cependant, il faut noter que la précision de l'anémomètre est d'environ 0,03 m/s et plus la vitesse du vent est faible, plus l'erreur relative de mesure est importante. Ceci explique le grand écart entre le taux PE calculé et celui mesuré dans le cas d'une vitesse du vent faible. La formule [6.22] permet donc de prendre en compte de façon satisfaisante l'effet de la vitesse du vent et l'effet de la température.

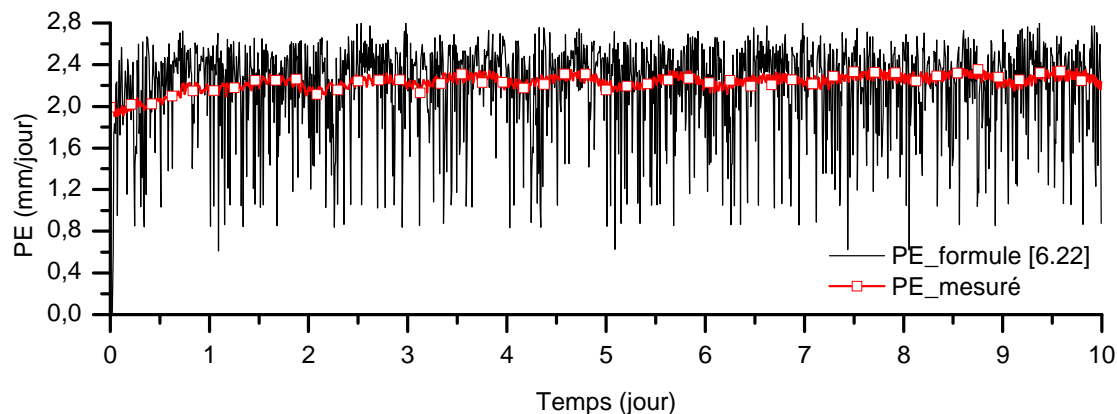


Figure 6.17 : PE calculé par [6.22] et PE mesuré lors du séchage 1

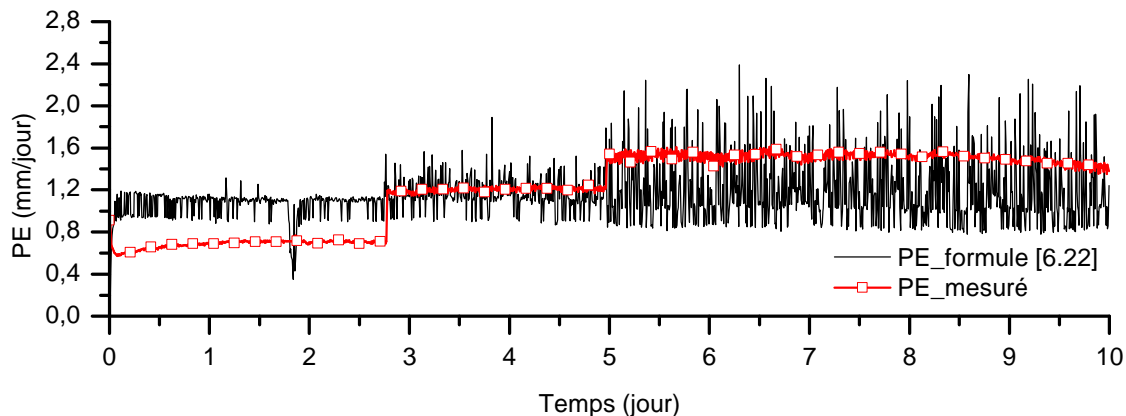


Figure 6.18 : PE calculé par [6.22] et PE mesuré lors du séchage 2

Après avoir obtenu le taux d'évaporation potentielle (PE), le calcul du taux d'évaporation réelle (AE) est ensuite réalisé selon la formule [6.14]. Le résultat est aussi comparé avec le taux AE mesuré par le bilan de vapeur d'eau pour les deux séchages. On note que le calcul du taux AE selon la formule [6.14] nécessite des données de température et de succion de surface du sol dans la chambre environnementale. La température de surface du sol est mesurée directement par le thermomètre à infrarouge et la succion de surface est mesurée par un tensiomètre. Cependant, le tensiomètre ayant une capacité de mesure de succion jusqu'à 1500

kPa, les valeurs de succion supérieures à 1500 kPa seront donc estimées à partir des courbes de rétention d'eau. On note qu'il existe différentes courbes de rétention d'eau correspondant aux différents niveaux de sol dans la chambre environnementale (Figure 5.16, 5.17, 5.37 et 5.38) et que l'évaporation a lieu principalement dans les couches de sol proches de la surface. Il vaut donc mieux utiliser seulement des données de succion et de teneur en eau de la couche de sol de 0 à 25 mm pour caler les paramètres du modèle de van Genuchten afin d'estimer la succion de surface d'après les courbes de rétention d'eau.

Les Figures 6.19 et 6.20 présentent les courbes de van Genuchten calées à partir des données de succion et de teneur en eau aux niveaux 0 mm et -25 mm pour les deux séchages. On obtient les valeurs suivantes pour les trois paramètres de van Genuchten :

- Pour le séchage 1 : ($\theta_s = 56,52 \%$ et $\theta_r = 6,5 \%$) : $n = 1,119$; $m = 0,106$; $\alpha = 2,288$.
- Pour le séchage 2 : ($\theta_s = 64,60 \%$ et $\theta_r = 6,5 \%$) : $n = 1,713$; $m = 0,416$; $\alpha = 0,185$.

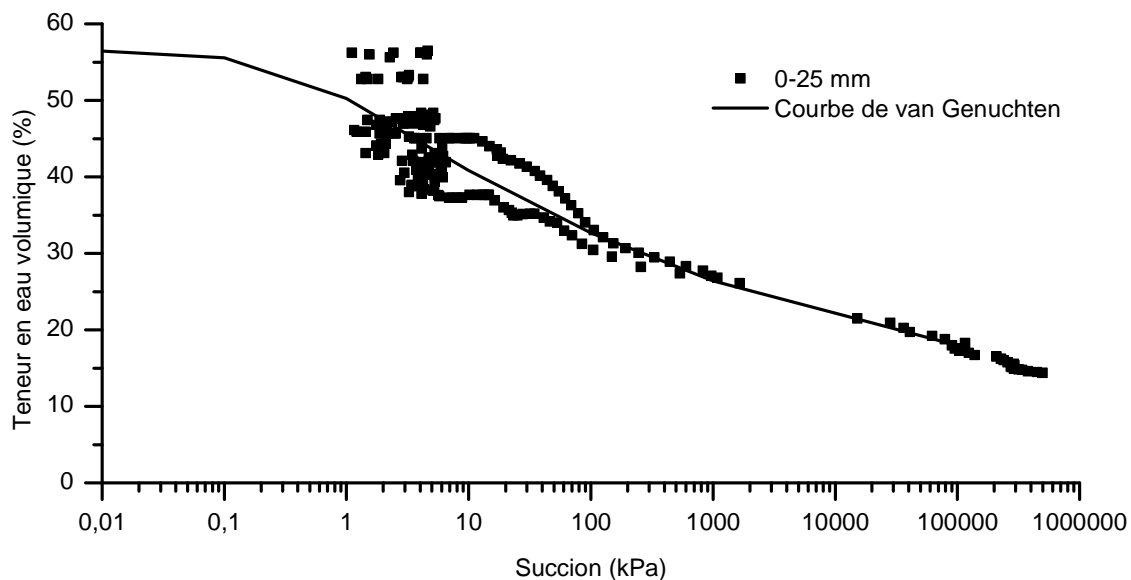


Figure 6.19 : Courbe de van Genuchten pour le séchage 1 (couche de sol 0-25 mm)

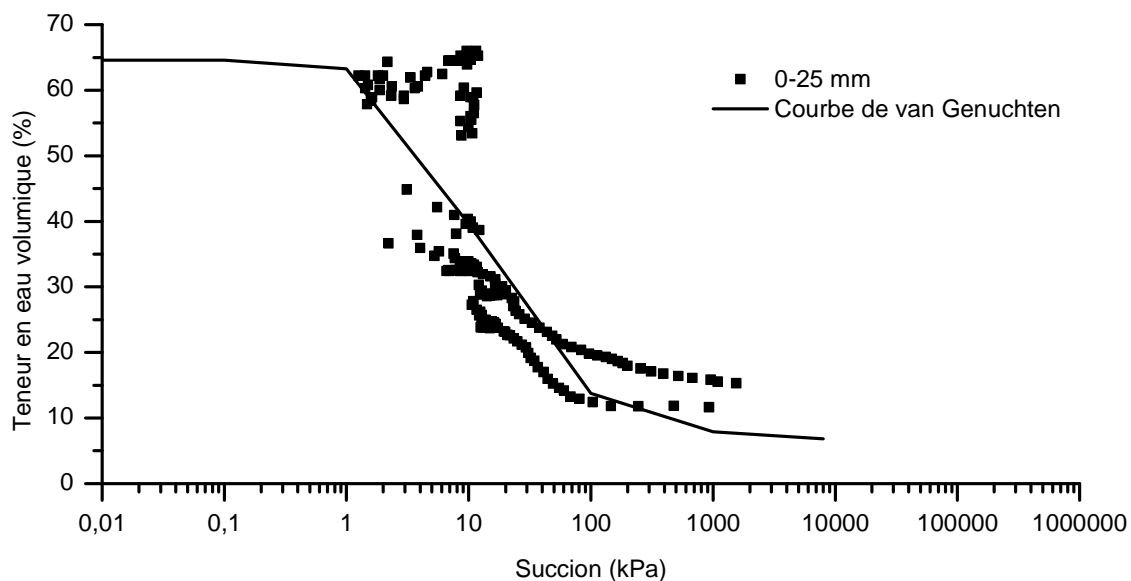


Figure 6.20 : Courbe de van Genuchten pour le séchage 2 (couche de sol 0-25 mm)

La méthode d'estimation des valeurs de succion supérieures à 1500 kPa est la suivante : on utilise d'abord les profils de teneur en eau des deux séchages pour extrapoler la teneur en eau à la surface du sol au cours de l'évaporation. Une relation linéaire est utilisée pour cette extrapolation de teneur en eau à la surface. Ensuite, ces valeurs de teneur en eau à la surface extrapolées sont prises pour estimer la succion à la surface en utilisant les courbes de van Genuchten ci-dessus. Il faut noter que seules les valeurs de succion supérieures à 1500 kPa et inférieures à 200 000 kPa sont estimées par cette méthode. Pour le sol sec ($s > 200\,000$ kPa), le potentiel de l'eau du sol sec est considéré comme en équilibre avec l'atmosphère, ainsi la succion à la surface du sol, dans cette gamme de succion, est déduite de l'équation de Kelvin [6.13] en tenant compte de la température et de l'humidité relative de l'air proche de la surface. Les Figures 6.21 et 6.22 présentent l'évolution de la succion à la surface mesurée ou estimée à partir des courbes de van Genuchten. Une concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées est observée. En plus, on observe également une évolution de la succion en trois phases dont les durées correspondent bien aux durées des trois phases de l'évaporation pour les deux séchages. La méthode d'estimation de la succion à la surface du sol à partir de la courbe de van Genuchten s'avère donc pertinente. Cette méthode permet en effet de compléter la gamme de succion que le tensiomètre ne peut pas mesurer.

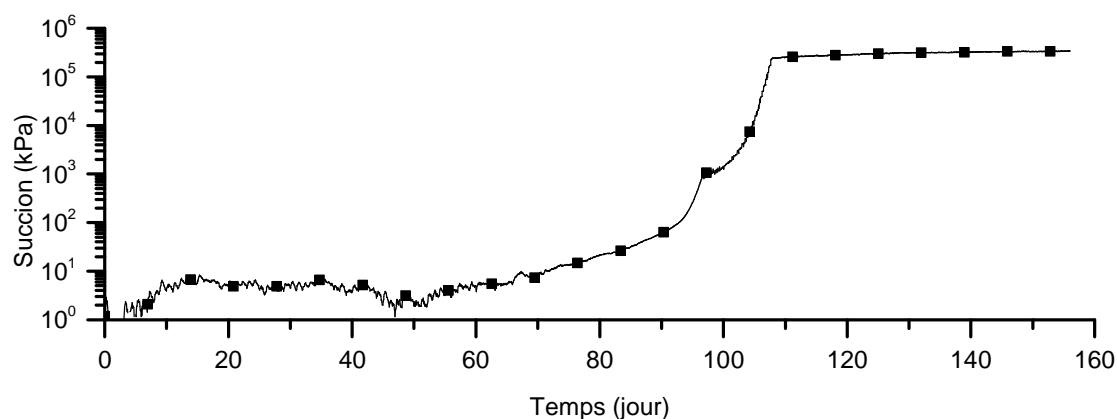


Figure 6.21 : Succion à la surface lors du séchage 1

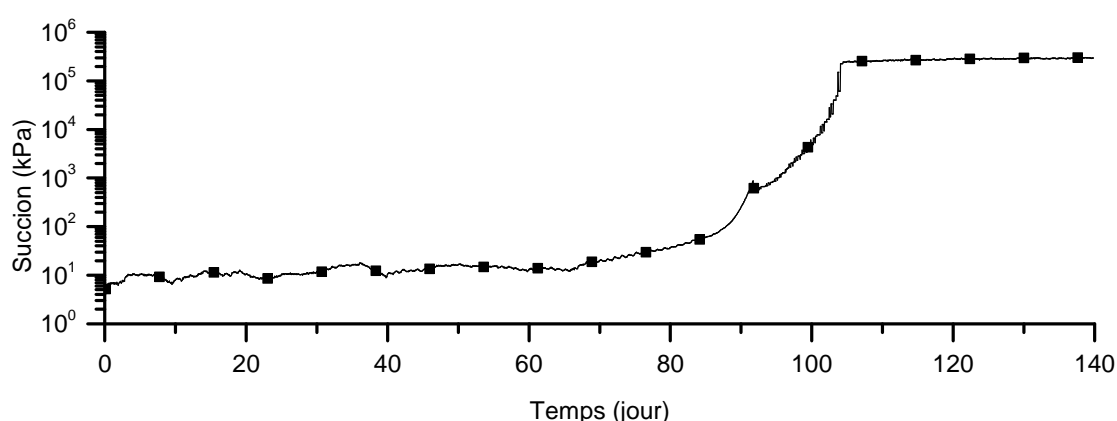


Figure 6.22 : Succion à la surface lors du séchage 2

Une fois le taux d'évaporation potentielle et la succion à la surface estimés, le rapport AE/PE est calculé selon la formule [6.14] pour les deux séchages. Les variations du taux PE , du rapport AE/PE et du taux AE lors du séchage 1 et lors du séchage 2 sont présentées sur la Figure 6.23 et sur la Figure 6.24, respectivement.

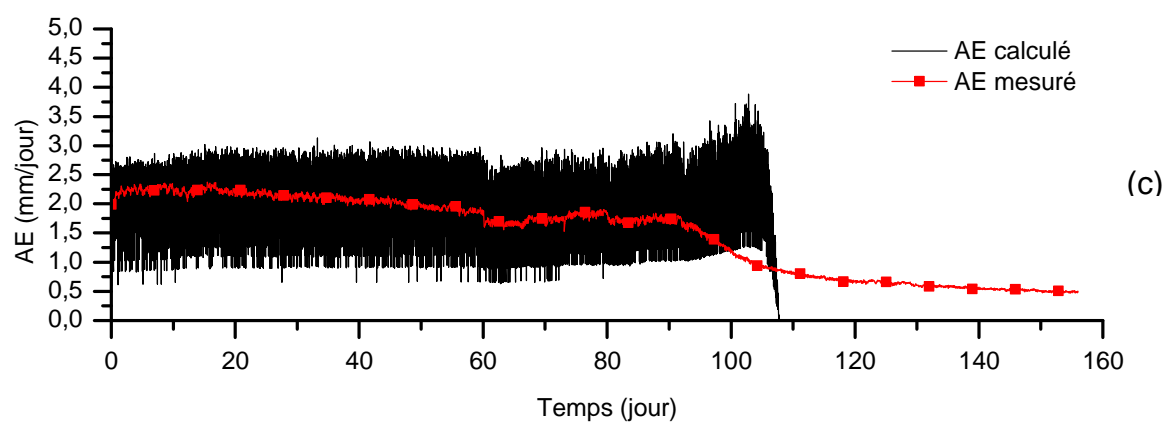
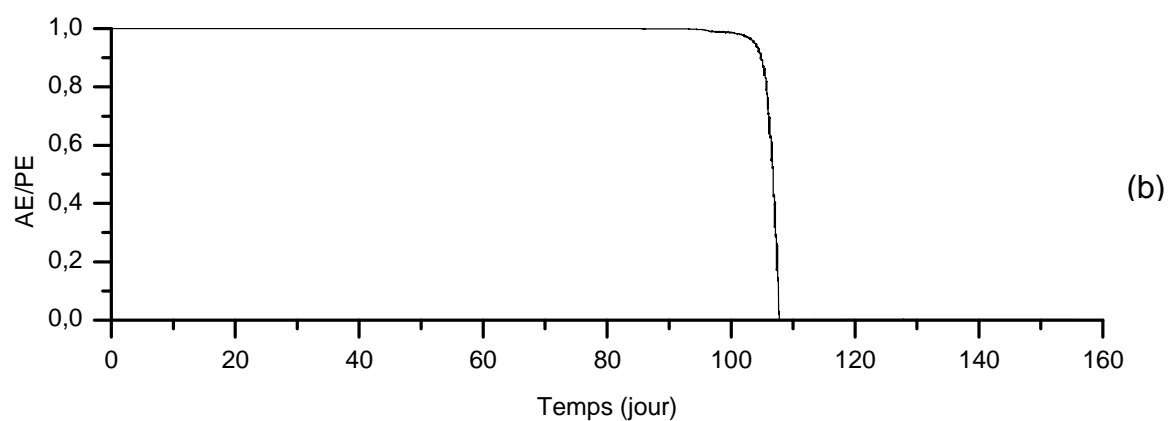
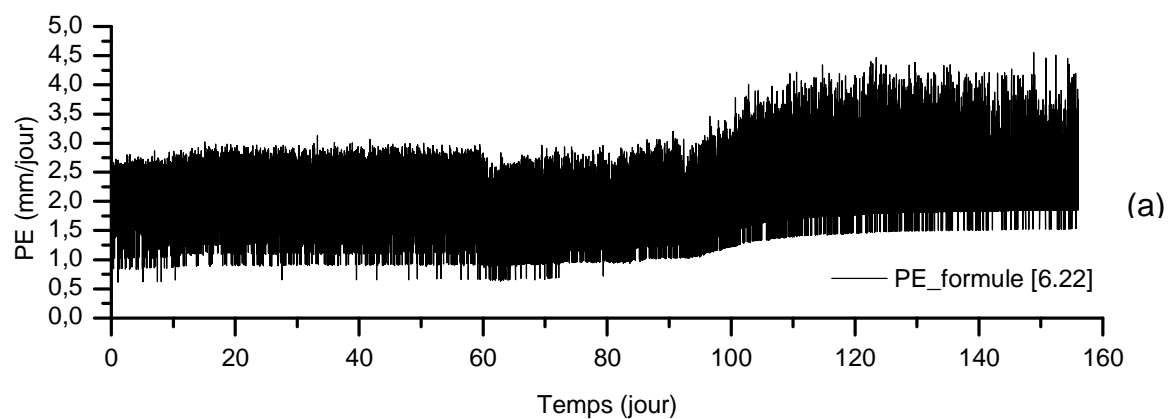
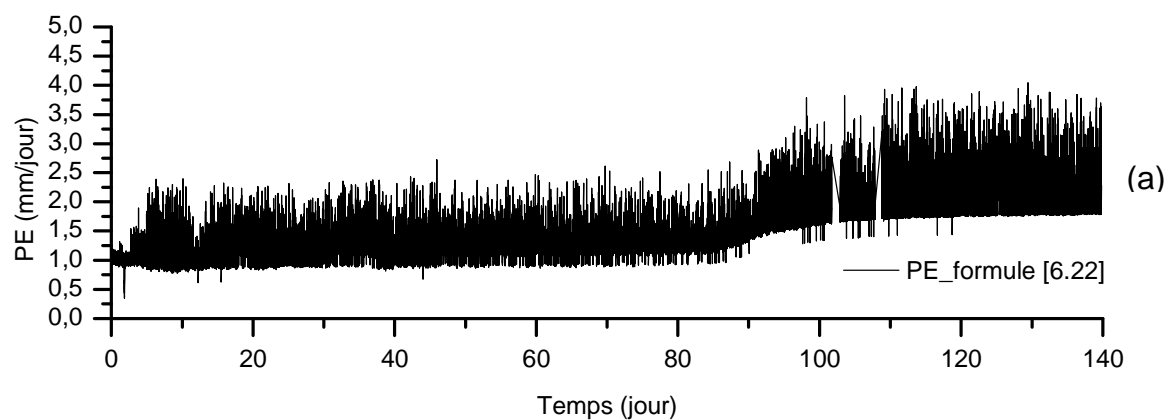


Figure 6.23 : Evolutions de PE , AE/PE , AE lors du séchage 1



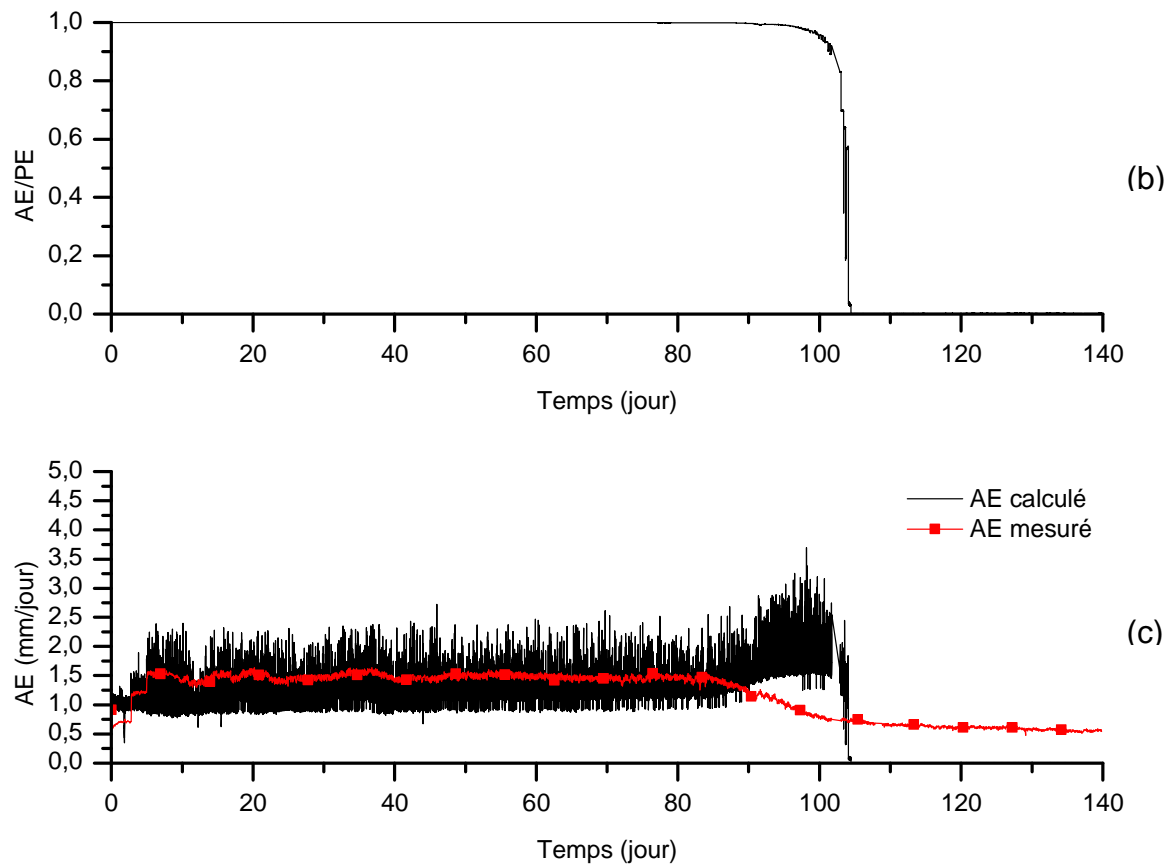


Figure 6.24 : Evolutions de PE , AE/PE , AE lors du séchage 2

On observe une augmentation en trois phases du taux d'évaporation potentielle (PE) pour les deux séchages (Figure 6.23a et Figure 6.24a). Les durées de ces phases correspondent aux durées des trois phases du taux d'évaporation réelle mesuré. En fait, cette augmentation du taux PE calculé selon la formule [6.22] est due à la diminution de l'humidité relative de l'air dans la zone proche de la surface du sol (h_a). Pour les deux séchages, on constate une phase de stabilisation du taux PE , de même durée que la première phase du taux AE mesuré. En effet, quand le taux AE mesuré commence à diminuer, l'augmentation du taux PE débute. Pendant la phase du taux PE maximum, un équilibre d'humidité entre le sol et l'air à l'interface est établi et comme il n'y a aucune diminution de l'humidité relative dans l'air, le taux PE reste constant.

Les allures des courbes AE/PE lors du séchage 1 et lors du séchage 2 peuvent être également divisées en trois phases : stabilisation et proche de 1, diminution et stabilisation à la valeur proche de 0 (Figure 6.23b et Figure 6.24b). Cependant, ces trois phases ne correspondent pas bien aux trois phases identifiées sur la courbe AE mesurée. Pour le séchage 1, la phase de diminution du rapport AE/PE commence à $t = 100$ jours tandis que cette phase de diminution du taux AE mesuré commence plus tôt, à $t = 91$ jours. En plus, cette phase de diminution du rapport AE/PE dure seulement environ 0,5 jour tandis que celle du taux AE mesuré dure 14 jours (Figure 6.23b). Ce décalage du début et de la durée de la phase de diminution du rapport AE/PE est également observé lors du séchage 2 (Figure 6.24b). Il faut noter cependant que le début et la durée de la phase de diminution de la succion à la surface du sol au cours des deux séchages correspondent bien à ce qui est observé pour le taux AE mesuré (Figure 6.21 et Figure 6.22). Dans le début de la phase de diminution du taux AE mesuré, bien que la succion à la surface du sol augmente de 10 à 10000 kPa, le rapport AE/PE diminue très peu de 0,99 à

0,90, ce qui explique le décalage de temps dans cette phase entre le rapport AE/PE et le taux AE mesuré. En outre, pour la troisième phase où le potentiel de l'eau du sol sec est en équilibre avec l'atmosphère, le rapport AE/PE est proche de 0.

La confrontation entre le taux AE calculé et celui mesuré pour les deux séchages dans les Figures 6.23c et 6.24c montre que, lorsque le sol est encore saturé ou presque saturé, le taux AE calculé a le même ordre de grandeur que celui mesuré. Cependant, quand le sol devient plus sec, l'allure de la courbe AE calculée ne correspond plus à celle de la courbe AE mesurée. Ce phénomène est observé pour les deux séchages et peut être expliqué par le décalage de temps dans la phase de diminution du rapport AE/PE par rapport au taux AE mesuré. En outre, pour la période d'équilibre d'humidité entre le sol et l'air à l'interface, le taux AE calculé est proche de 0, ce qui est beaucoup plus faible que le taux mesuré pour les deux séchages (0,5 mm/jour). La formule [6.14] ne donne donc pas une bonne estimation du taux AE dans la phase de diminution ainsi que la phase de taux AE faible.

4.3. Discussions

La méthode de bilan de vapeur d'eau utilisée pour calculer l'évaporation dans la chambre environnementale a donné de bons résultats, validés par le calcul de la méthode de bilan d'eau. On note que cette méthode a été déjà validée dans les travaux de Mohamed et al. (2000), Aluwihare et Watanabe (2003) et Ta (2009).

Pour estimer le taux d'évaporation potentielle PE dans la chambre environnementale, une simple formule généralisée qui est fonction de la vitesse du vent et de l'humidité relative de l'air est choisie dans les modèles existant dans la littérature. Le calage des paramètres de la fonction $f(u)$ de cette formule généralisée est réalisé avec une fonction logarithmique permettant d'avoir une bonne estimation du taux d'évaporation potentielle. La nouvelle formule [6.22] proposée dans cette étude donne de bons résultats par comparaison avec les données expérimentales du taux d'évaporation potentielle PE obtenues lors des deux séchages 1 et 2 dans la chambre environnementale, sauf dans le cas de la vitesse du vent qui reste inférieure à 0,05 m/s à cause de la faible précision du capteur de mesure de vitesse du vent dans cette gamme de valeur. En outre, on note également que la fonction $f(u)$ trouvée dans le travail de Ta (2009) n'est pas logarithmique mais linéaire. En effet, on a trouvé que le taux d'évaporation lorsque l'eau est encore présente à la surface du sol (PE) est en relation linéaire avec le débit d'air (Figure 6.9). Si on suppose que la vitesse du vent dans la chambre environnementale est proportionnelle au débit d'air car la section de passage ne change pas, le taux d'évaporation doit être en relation linéaire avec la vitesse du vent dans la chambre comme dans le travail de Wang (2006) et Ta (2009). Cependant, cette relation linéaire n'est pas encore adaptée à cette étude. La différence entre cette étude et les autres travaux peut être expliquée par une gamme de vent moins importante au cours des essais d'évaporation. Par exemple, Ta (2009) a utilisé une gamme de vent plus importante comprise entre 0,35 m/s et 0,5 m/s et il en a déduit une relation linéaire. Ceci confirme la nécessité de mesurer directement la vitesse du vent et de calibrer la fonction $f(u)$ pour chaque étude sur le taux PE .

Dans la formule de PE obtenue [6.22], la dépendance forte de l'évaporation potentielle aux conditions atmosphériques est exprimée par la prise en compte explicite de la vitesse du vent et de l'humidité relative de l'air. En outre, ce taux PE dépend fortement de la température de l'air T_a , et cette influence peut être considérée dans l'humidité relative de l'air h_a . Le taux d'évaporation potentielle PE calculé par la formule [6.22] augmente en général durant le séchage. Cette augmentation peut être divisée en trois phases : une phase de stabilisation au début qui correspond à la phase d'évaporation maximale, une phase d'augmentation due à la

diminution de l'humidité relative de l'air dans la zone proche de la surface du sol, et une phase de taux PE maximale correspondant à l'équilibre d'humidité entre le sol et l'air à l'interface.

Les rapports AE/PE établis pour les deux séchages en utilisant le modèle [6.14] en fonction de la succion à la surface du sol présentent une évolution en trois phases qui cependant ne correspondent pas aux phases identifiées pour le taux AE mesuré. Cette discordance dans la phase de diminution du rapport AE/PE provoque donc un décalage de durée de temps dans le calcul du taux d'évaporation AE . On note que d'après Campbell (1985), ce type de modèle, fonction de la succion à la surface du sol, n'arrive pas à prédire le taux d'évaporation au cours de la troisième phase d'évaporation. Dans cette étude, on a trouvé que le modèle [6.14], fonction de la succion à la surface du sol, n'est pas adapté pour estimer le taux AE dans la troisième phase de taux évaporation faible ainsi que dans la deuxième phase de diminution de taux d'évaporation.

4.4. Rôle des microstructures des sols argileux dans les phénomènes de transfert d'eau sol-atmosphère

Lors des deux phases de séchage de l'étude sur l'argile d'Héricourt traitée à la chaux, une évolution du taux d'évaporation en trois phases distinctes est observée comme dans la littérature (Wilson 1990 ; Hillel 2004 ; Lal et Shukla 2004). Cependant, le taux d'évaporation lors des deux séchages de ce type de sol diminue seulement avec un niveau d'eau imposé au fond du massif de sol. On note que le processus d'évaporation en trois phases est observé pour l'argile d'Héricourt non-traitée même quand le niveau d'eau est imposé à la surface du massif de sol. Dans cette étude la comparaison de l'évolution du taux d'évaporation en trois phases de l'argile d'Héricourt non-traitée (Song 2014) et traitée à la chaux permet de souligner le rôle de la microstructure dans le processus d'évaporation. On sait que les microstructures des sols argileux contrôlent leurs propriétés hydrauliques ou les processus de transfert d'eau, et donc affectent la cinétique d'évaporation. On a bien montré dans le chapitre 1 que le traitement à la chaux modifie la microstructure de l'argile d'Héricourt en augmentant sa conductivité hydraulique. Cet effet a été également montré par la comparaison des courbes de conductivité hydraulique de ces deux sols à l'échelle de la chambre environnementale (chapitre 5). En outre on sait que, pendant la première phase d'évaporation (ou le sol est à l'état saturé ou presque saturé), le processus d'évaporation est contrôlé par deux mécanismes : l'évaporation à la surface du sol et l'infiltration à l'intérieur du sol depuis sa base. Si l'infiltration fournit suffisamment d'eau à la surface pour l'évaporation, cette phase continue. Dans le cas contraire, le taux d'évaporation diminue et la deuxième phase d'évaporation commence. Pour le séchage de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux (qui a une conductivité hydraulique plus élevée), l'eau transférée dans ce sol vers la surface est suffisante pour permettre à la première phase d'évaporation de durer longtemps. En fait, la deuxième phase d'évaporation de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux ne commence qu'après l'abaissement du niveau d'eau dans le sol. Dans le cas de l'argile d'Héricourt non-traitée (qui a une conductivité hydraulique moins élevée), l'eau transférée dans ce sol vers la surface n'est pas suffisante pour permettre à la première phase d'évaporation de durer longtemps. La deuxième phase d'évaporation commence même avec un niveau d'eau maintenu à la surface du sol. On note donc que la microstructure du sol contrôle la cinétique des échanges sol-atmosphère.

L'effet similaire des microstructures sur l'évaporation est démontré clairement dans les travaux de Yang et Yanful (2002). Ils ont réalisé une série d'essais avec différents types de sol (argile, sable grossier, sable fin et limon). Les colonnes de ces sols sont saturées, puis soumises à l'évaporation et au drainage avec différents niveaux d'eau. Les évolutions des taux

d'évaporation avec ces différents types de sols, dans différentes conditions de niveau d'eau, sont présentées dans la Figure 6.25. Trois niveaux d'eau sont imposés à 0,25 m au-dessus du fond du sol, au fond du sol et à 1 m sous le fond du sol. Les résultats montrent que le processus de drainage affecte de manière significative le processus d'évaporation. On note que, quand on abaisse le niveau d'eau, il existe un autre mécanisme, le drainage, qui affecte aussi le processus d'évaporation outre les deux mécanismes généraux (l'évaporation à la surface du sol et l'infiltration à l'intérieur du sol), la microstructure contrôlant également ce mécanisme de drainage. Plus la conductivité hydraulique du sol est élevée, plus l'effet de drainage sur l'évaporation est faible. D'après Yang et Yanful (2002), le taux d'évaporation des sables diminue avec la diminution du niveau d'eau. L'ampleur de cet effet sur le limon est moindre que sur les sables. L'argile n'est pas affectée par la variation du niveau d'eau et le processus de drainage.

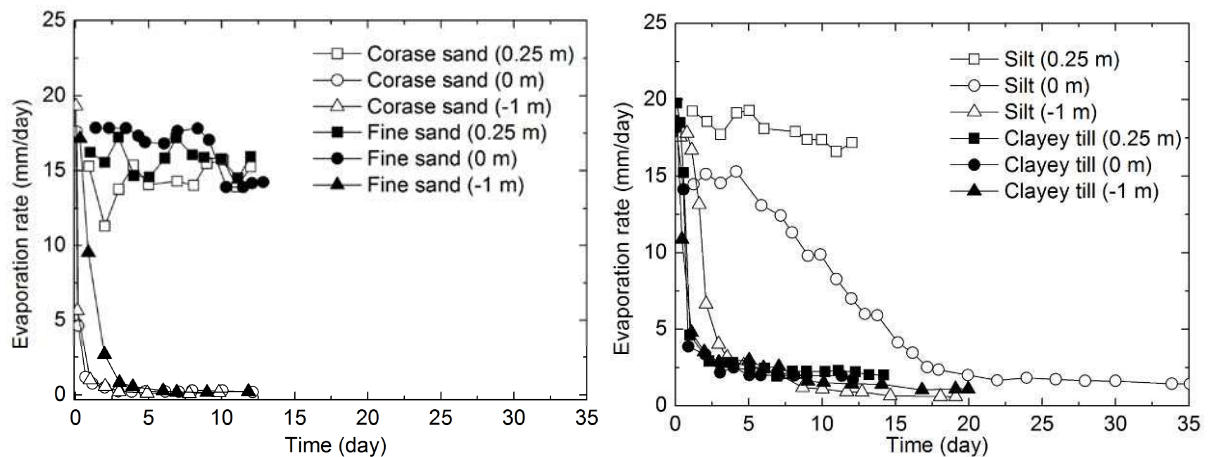


Figure 6.25 : Evolutions des taux d'évaporation pour différentes conditions de niveau d'eau (Yang et Yanful 2002)

5. Conclusions

Pour étudier le phénomène d'évaporation, le calcul du taux d'évaporation dans la chambre environnementale a été réalisé selon la méthode du bilan de vapeur d'eau. Ce résultat de calcul du taux d'évaporation est ensuite validé par une autre méthode qui est la méthode de bilan d'eau. Une première analyse a montré que ce taux est en relation avec la vitesse du vent.

L'estimation du taux d'évaporation réelle AE à partir du rapport AE/PE nécessite logiquement la connaissance du taux d'évaporation potentielle PE . Une formule généralisée est choisie pour un calage en fonction de la vitesse du vent, ce qui a permis d'exprimer le taux d'évaporation potentielle PE convenablement. Le calcul du taux d'évaporation potentielle PE pour les séchages a montré une augmentation du taux PE en trois phases : une phase de stabilisation au début qui correspond à la phase d'évaporation maximale, une phase d'augmentation due à la diminution de l'humidité relative de l'air dans la zone proche de la surface du sol, et une phase de taux PE maximale correspondant à l'équilibre d'humidité entre le sol et l'air à l'interface. Le rapport AE/PE en fonction de la succion de la surface du sol a été établi et étudié. On a constaté une discordance entre l'évolution de ce rapport et l'évolution du taux AE mesuré. En effet, le rapport AE/PE présente aussi trois phases avec cependant un décalage de temps pour la deuxième phase par rapport au taux AE . L'utilisation de la formule [6.14] suivant le modèle de Wilson et al. (1997) ne permet donc pas d'avoir une

bonne estimation du taux AE pour les deuxième et troisième phases d'évaporation, par référence aux résultats expérimentaux obtenus dans cette étude.

En outre, dans cette étude la comparaison de l'évolution du taux d'évaporation en trois phases de l'argile d'Héricourt non-traitée (Song 2014) et traitée à la chaux permet de mettre en évidence le rôle de la microstructure dans le processus d'évaporation. On a observé que les microstructures des sols argileux contrôlent les processus de transfert d'eau dans ce type de sol et donc affectent la cinétique des échanges sol-atmosphère. On a montré dans cette étude que le traitement à la chaux modifie la microstructure du sol et augmente sa conductivité hydraulique (au moins dans le premier temps), affectant ainsi la cinétique d'évaporation.

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse est réalisé dans le contexte de sécheresses géotechniques et de dommages sur le bâti pavillonnaire. L'analyse bibliographique a permis de montrer que le processus de retrait-gonflement des sols argileux est à l'origine de ces dommages et que les déformations de ces sols en cours d'humidification ou de dessiccation résultent de mécanismes multiples qui prennent leur source dans la nature minéralogique et la microstructure de ces sols. L'objectif général de cette étude est donc d'apporter une contribution à la compréhension et à la caractérisation du retrait-gonflement des sols argileux. Deux formations de sol argileux en France, les Argiles Plastiques du Sparnacien et l'argile d'Héricourt du Lias sont étudiées, à différentes échelles et différents états (intact, remanié, compacté et traité à la chaux), en considérant spécialement le rôle de la microstructure.

Les différentes études réalisées sur les Argiles Plastiques du Sparnacien et sur l'argile d'Héricourt permettent de confirmer les premiers résultats obtenus antérieurement sur les Argiles Vertes de Romainville et les Marnes Bleues d'Argenteuil (Yigzaw 2009). Le rôle de la microstructure des sols argileux dans leur comportement au retrait-gonflement est nettement mis en évidence au travers des différentes sollicitations hydriques conduites au laboratoire, avec l'aide de la porosimétrie au mercure et l'observation au microscope électronique à balayage. On peut concevoir que les phénomènes de retrait-gonflement trouvent leur origine principale dans la nature minéralogique de la fraction argileuse des sols, mais leurs micro-structures jouent aussi un rôle très important car elles contrôlent les modalités d'accès des molécules d'eau dipolaires aux sites d'adsorption présents à la surface, externe ou interne, des minéraux argileux.

Les résultats obtenus à partir des études présentées dans ce mémoire de thèse sont rappelés :

1. L'établissement des caractéristiques minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques des Argiles Plastiques du Sparnacien (AP ou APS, APM et API) et de l'argile d'Héricourt (AH) a permis de poser les bases d'une comparaison avec d'autres sols argileux et en particulier les Argiles Vertes de Romainville (AVR) et les Marnes Bleues d'Argenteuil (MBA).
2. L'étude du phénomène de gonflement (gonflement libre et potentiel de gonflement, pressions de gonflement), pour des sols argileux à l'état naturel, remaniés ou compactés (Argiles plastiques du Sparnacien et argile d'Héricourt) permet de retrouver à nouveau un résultat aujourd'hui bien établi : même s'il existe une réponse spécifique de chaque type de sol, cette réponse, en terme de potentiel de gonflement et pression de gonflement, dépend fortement de l'état initial du sol (teneur en eau, masse volumique sèche). L'étude des échantillons de AP et la comparaison avec l'étude des échantillons de AVR et MBA ont permis de confirmer le rôle de deux familles de facteurs dans les processus de retrait-gonflement des sols argileux :
 - a. La composition minéralogique : les Smectites et interstratifiés Illite-Smectite favorisent le gonflement, ce qui n'est pas le cas de la Kaolinite. Le gonflement est contrarié par la présence de carbonates mais aussi de quartz, la présence de ces minéraux limitant l'influence des minéraux argileux. A l'état intact, le gonflement libre dépend du taux et de la répartition de carbonates ou de quartz ;

- b. La microstructure : pour un pourcentage en carbonates ou en quartz donné, la sensibilité au gonflement est plus importante pour le sol remanié au laboratoire que pour le sol intact. En effet, le remaniement détruit, au moins partiellement, des éléments de microstructures qui contrariaient le gonflement : ponts carbonatés entre agrégats argileux dans les sols argileux carbonatés, amas de grains de quartz insensibles au gonflement dans les sols argileux riches en quartz.
3. L'étude des phénomènes de retrait et de la fissuration des sols argileux a permis de souligner encore le rôle de la microstructure, en comparant les comportements de sols intacts et de sols remaniés au laboratoire, ce remaniement détruisant en grande partie la microstructure initiale. Les comportements différenciés de ces deux catégories de sols permet ainsi de bien mettre en évidence le rôle de la microstructure, tous autres paramètres (minéralogiques en particulier) restant inchangés.

Dans l'analyse de APM intact, les cycles successifs d'humectation-dessiccation révèlent d'anciennes surfaces de cisaillement ou « slickensides » qui s'ouvrent à nouveau sous l'effet des sollicitations hydriques. Pour APS et API intacts qui ne comportent pas de telles caractéristiques dans leur microstructure, aucune fissuration n'apparaît au cours des cycles successifs, quelle que soit la teneur en eau atteinte. C'est une autre illustration du rôle de la microstructure. Parallèlement, les trois sols remaniés ne présentent pas de fissuration pour les éprouvettes placées sur une surface lisse. Cette absence de fissuration peut-être attribuée au frottement très faible de l'interface téflon/sol argileux et à la destruction des « slickensides » par le remaniement dans le cas de APM. Il a été noté aussi que, dans ces essais de retrait, la nature de l'interface matériau-support ainsi que le rapport hauteur de l'échantillon rapportée au diamètre jouent un rôle important dans le développement de la fissuration des matériaux remaniés.

Dans le cas des Argiles Vertes de Romainville intactes, des surfaces de micro-cisaillement ou « slickensides » favorisent aussi l'ouverture de fissures, alors que, dans le cas des Marnes Bleues d'Argenteuil intactes, un squelette semi-rigide formé par les carbonates contrarie la fissuration. Pour l'Argile Verte de Romainville remaniée, aucune fissuration n'a été observée et cette absence de fissuration peut-être attribuée au faible frottement de l'interface téflon/argile à la base des éprouvettes. Lorsque les Marnes Bleues d'Argenteuil sont remaniées, le squelette semi-rigide est détruit, les grains de carbonates jouent alors un rôle de points durs, en créant des forces de frottement au contact du support qui s'opposent localement aux forces de rétraction et favorisent ainsi la fissuration. Cette fissuration est observée sur les échantillons séchés sur une surface lisse ou rugueuse. La nature de la surface de contact et le volume des échantillons jouent aussi un rôle important dans la fissuration des matériaux remaniés.

4. Les études du comportement des sols argileux (Argiles Plastiques du Sparnacien et argile d'Héricourt) sous sollicitations hydriques cycliques accélérées ont permis de retrouver des résultats établis pour les Argiles Vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil : stabilisation des déformations dès le troisième cycle pour le sol intact (dans le cas de APM intact) et pour le sol compacté (dans le cas de l'argile d'Héricourt compactée). Cependant, une augmentation progressive du volume apparaît, due à l'accumulation de gonflements résiduels. Ceci résulte d'une irréversibilité partielle du phénomène de retrait-gonflement. En outre, l'ouverture de fissures de retrait au cours du premier séchage de ces échantillons influence la cinétique de gonflement lors des cycles suivants, augmentant la perméabilité du sol. Pour le sol argileux (AH) traité à la chaux,

les sollicitations hydriques cycliques n'ont aucune influence sur le comportement du sol jusqu'au quatrième cycle.

L'évolution de la microstructure des sols au cours des cycles de retrait-gonflement, est quantifiée par les analyses de porosimétrie au mercure et observée au microscope électronique à balayage. Une augmentation de la taille et du volume des pores est mise en évidence au cours de l'hydratation du matériau intact et compacté. C'est principalement la porosité inter-agrégats naturels qui est modifiée, avec une transformation progressive et irréversible de la microstructure au cours des cycles successifs de séchage-humidification. L'augmentation du rayon d'accès de la famille de pores inter-agrégats jusqu'au quatrième cycle et une distribution de rayons de pores qui tend à se stabiliser ensuite sont à l'origine de l'évolution du volume poreux des sols sous ces sollicitations hydriques cycliques. Aucune influence sur la famille de pores intra-agrégat n'est observée au cours des cycles de retrait-gonflement. Pour le sol compacté (dans le cas de l'argile d'Héricourt compactée), les cycles de sollicitations hydriques n'influencent pas la famille de pores intra-agrégat. Ces cycles n'affectent pas la taille des pores inter-agrégats mais entraînent une augmentation de nombre des pores inter-agrégats en divisant des agrégats artificiels du sol compacté, ce qui est à l'origine du changement de volume poreux du sol. Concernant le sol traité à la chaux, la microstructure du sol traité à la chaux n'est pas affectée significativement par les sollicitations hydriques cycliques mais affectée principalement par le temps de cure ou la réaction pouzzolanique qui crée de nouveaux hydrates en reliant les agrégats et remplissant les pores inter-agrégats en même temps.

5. Le processus de gonflement et de retrait d'un sol argileux traité à la chaux (argile d'Héricourt) a été étudié dans une chambre environnementale, à une échelle proche de l'échelle in-situ, dans le chapitre 5. L'évolution de la microstructure au cours de cycles d'humidification-séchage est aussi étudiée à cette échelle. Ces études ont pour but de faire des comparaisons avec les résultats obtenus à l'échelle de l'éprouvette dans les chapitres précédents.

La chambre environnementale est un grand dispositif qui permet de réaliser des essais d'infiltration et d'évaporation sur un massif de sol d'environ $0,2 \text{ m}^3$: l'argile d'Héricourt compactée et traitée à la chaux. Près de cinquante capteurs ont été employés, permettant le suivi complet des paramètres du sol (la succion, la teneur en eau, l'humidité relative, la température, le gonflement de la surface, la fissuration) et de l'air (l'humidité relative, la température, la vitesse du vent). Avec cette chambre environnementale, on a réalisé une phase d'humidification suivie d'une phase de séchage. Deux cycles d'humidification-séchage ont été effectués afin d'étudier différents paramètres intervenant dans le processus d'humidification et d'évaporation.

La phase d'humidification a nécessité une période de 3 jours pour le premier cycle et de 15 jours pour la resaturation. Les résultats obtenus dans ces phases d'infiltration ont montré une bonne performance des capteurs utilisés et permettent de mieux comprendre le phénomène d'hydratation du sol traité à la chaux à l'échelle de la chambre environnementale. Cette hydratation a duré environ 3 jours, comme pour l'hydratation à l'échelle de l'éprouvette. Un gonflement libre de 18 % s'est produit au cours de l'hydratation dans la chambre environnementale comme à l'échelle de l'éprouvette. Ce gonflement est expliqué par l'hydratation et l'expansion de la chaux en contact avec l'eau. Durant la première phase d'humidification, on a constaté un effet de bord important dans le gonflement du sol à la surface. En effet, le gonflement au milieu de la surface est

plus important que celui aux bords. Concernant la microstructure du sol traité à la chaux à l'échelle de la chambre environnementale, comme à l'échelle de l'éprouvette, l'humidification provoque l'augmentation du volume des pores inter-agrégats naturels et en conséquence l'augmentation du volume des pores total. Aucun changement dans la taille des pores intra-agrégat n'est observé après deux phases d'humidification. En outre, le volume poreux des pores inter-agrégats (naturels et compactés) du sol diminue relativement dans le temps par rapport à celui des pores intra-agrégat à cause du développement dans le temps des hydrates CSH qui remplissent les pores inter-agrégats du sol traité à la chaux.

La phase de séchage est réalisée en imposant un flux d'air chaud à la surface du sol et en faisant varier un niveau d'eau. L'air imposé étant très sec à l'entrée, les séchages ont été intensifiés. La température dans la chambre environnementale a atteint 34 °C pour une longue durée et la vitesse du vent était de l'ordre de 0,2 m/s. En utilisant les données des phases de séchage, la courbe de rétention d'eau et la conductivité hydraulique ont été déterminées en fonction de la succion. La conductivité hydraulique de l'argile d'Héricourt traitée à la chaux est de 10^{-16} m/s pour une succion forte de 100 MPa et de 10^{-7} m/s pour une succion faible de 1 kPa. On a constaté une bonne concordance entre la courbe de rétention d'eau obtenue sur l'argile d'Héricourt traitée à la chaux dans la chambre environnementale et la courbe obtenue sur l'argile d'Héricourt traitée à la chaux à l'échelle de l'éprouvette. De plus, l'effet de l'échelle ou l'effet de profondeur est observé sur les courbes de rétention d'eau des deux séchages. Ces résultats ont permis de construire les courbes de rétention d'eau des couches de sol différentes dans la chambre environnementale. Quant à l'effet de séchage sur la microstructure du sol à l'échelle de la chambre environnementale, comme à l'échelle de l'éprouvette, le séchage entraîne une diminution du volume des pores inter-agrégats naturels dans le sol traité à la chaux et il n'y a toujours pas de changement dans la taille des pores intra-agrégat. En outre, le séchage n'entraîne pas de retrait dans le sol traité à la chaux et les fissures ne se développent pas à la surface du sol, contrairement à ce qui se passe dans le cas du sol non-traité et d'autres sols argileux. Ce phénomène est expliqué par l'existence des hydrates créés par la réaction entre la chaux et les minéraux argileux en présence d'eau dans le sol traité à la chaux. Ces hydrates relient des agrégats argileux et contribuent à une rigidification du squelette du sol, empêchant la création de fissures dans le sol.

6. Pour étudier le phénomène d'évaporation, le calcul du taux d'évaporation dans la chambre environnementale a été réalisé selon la méthode du bilan de vapeur d'eau. Ce résultat de calcul du taux d'évaporation est ensuite validé par une autre méthode qui est la méthode de bilan d'eau. Une première analyse a montré que ce taux est en relation avec la vitesse du vent.

L'estimation du taux d'évaporation réelle AE à partir du rapport AE/PE nécessite logiquement la connaissance du taux d'évaporation potentielle PE . Une formule généralisée est choisie pour un calage en fonction de la vitesse du vent, ce qui a permis d'exprimer le taux d'évaporation potentielle PE convenablement. Le calcul du taux d'évaporation potentielle PE pour les séchages a montré une augmentation du taux PE en trois phases : une phase de stabilisation au début qui correspond à la phase d'évaporation maximale, une phase d'augmentation due à la diminution de l'humidité relative de l'air dans la zone proche de la surface du sol, et une phase de taux PE maximale correspondant à l'équilibre d'humidité entre le sol et l'air à l'interface. Le rapport AE/PE en fonction de la succion de la surface du sol a été établi et étudié. On a constaté une discordance entre l'évolution de ce rapport et l'évolution du taux AE mesuré. En effet, le

rapport AE/PE présente aussi trois phases avec cependant un décalage de temps pour la deuxième phase par rapport au taux AE . L'utilisation de la formule [6.14] ne permet donc pas d'avoir une bonne estimation du taux AE pour les deuxième et troisième phases d'évaporation.

En outre, la comparaison de l'évolution du taux d'évaporation en trois phases de l'argile d'Héricourt non-traité et traité à la chaux permet de mettre en évidence le rôle de la microstructure dans le processus d'évaporation. Les microstructures des sols argileux contrôlent les processus de transfert d'eau dans ce type de sol et donc affectent la cinétique des échanges sol-atmosphère. On a montré dans cette étude que le traitement à la chaux modifie la microstructure du sol et augmente sa conductivité hydraulique (au moins dans le premier temps), affectant ainsi la cinétique d'évaporation.

Enfin, le travail de ce mémoire de thèse a permis de synthétiser les types de microstructures des sols argileux à différents états (intact, remanié, compacté, traité à la chaux) en se basant sur la description des agrégats. Elles sont présentées dans les tableaux de synthèse ci-après.

En perspective, on peut dire que la compréhension des phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux et la mise en évidence du rôle très important de la microstructure de ces sols, jusqu'alors peu étudiée, permet d'ouvrir la voie à une démarche plus adaptée dans l'identification de la susceptibilité des sols argileux aux phénomènes de retrait-gonflement et la caractérisation des sites pour la construction sur terrains argileux. Cependant, après ce travail de thèse il reste encore des études à compléter, sur le comportement hydromécanique des formations étudiées, sur l'identification d'une valeur seuil de teneur en carbonates ou teneur en quartz susceptible d'affecter significativement les comportements hydromécaniques. Le rôle de l'agencement de ces minéraux au sein de la microstructure des sols argileux doit aussi être précisé, même si les comparaisons entre sol intact et sol remanié ont déjà apporté des éléments de réponse. Par ailleurs, la conductivité hydraulique de la formation d'Argile Plastique, nécessaire pour les études des échanges sol-atmosphère et du comportement mécanique des sols gonflants, reste à étudier.

En outre, les études de modification de la microstructure des sols dans ce mémoire de thèse ont été réalisées sur des échantillons de sols gonflés dans les conditions libres, sous une charge faible. Il reste encore à réaliser des études microstructurales sur ces sols, sous des charges ou des suctions contrôlées plus importantes, afin d'améliorer la connaissance des microstructures de ces sols sous des conditions proches des conditions in-situ.

On sait qu'une formation de sol gonflant doit aussi ses caractéristiques de comportement à l'épaisseur des couches, aux hétérogénéités, aux structures d'échelles métriques. Ainsi, outre des caractérisations au laboratoire, il est nécessaire de réaliser des mesures sur site des déformations volumiques sous des conditions in-situ de variation de l'humidité du sol. C'est un autre large domaine de recherche.

Tableau I : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état intact

Etat intact							
Etat hydrique		<i>Etat initial naturel</i>		<i>Séché à l'étuve à 105°C</i>		<i>Saturé (gonflement libre)</i>	
APS	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels
	Taille des pores	0,025 μm et 0,09 μm	volume non significatif	0,025 μm	non	0,025 μm	0,15 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec deux familles de pores intra-agrégat. - Contenant des amas de Quartz contrariant le gonflement. 		<ul style="list-style-type: none"> - Le séchage à l'étuve détruit la famille de pores intra-agrégat la plus grande - Diminution du volume total du sol 		<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande et la transforme en une famille de pores inter-agrégats naturels - Augmentation du volume total du sol 	
APM	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels
	Taille des pores	0,03 μm	non	0,02 μm	non	0,03 μm	0,15 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec une famille de pores intra-agrégat. - Contenant des slickensides qui favoriseront l'ouverture de fissures. 		<ul style="list-style-type: none"> - Le séchage à l'étuve détruit en partie la famille de pores intra-agrégat - Diminution du volume total du sol 		<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification ouvre les pores entre des agrégats et crée donc une famille de pores inter-agrégats naturels - Augmentation du volume total du sol 	
API	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels
	Taille des pores	0,007 μm	0,4 μm	0,007 μm	non	0,01 μm	1,5 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure en agrégats avec deux familles de pores : une intra-agrégat et une inter-agrégats. 		<ul style="list-style-type: none"> - Le séchage à l'étuve détruit la famille de pores inter-agrégats - Diminution du volume total du sol 		<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels et un peu la taille de la famille intra-agrégat 	

						- Augmentation du volume total du sol	
E-AVR-0*	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels
	Taille des pores	0,02 μm et 0,07 μm	<i>volume non significatif</i>	0,017 μm	<i>non</i>	0,02 μm	0,32 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec deux familles de pores intra-agrégat. - Contenant des slickensides qui favoriseront l'ouverture de fissures. 		<ul style="list-style-type: none"> - Le séchage à l'étuve détruit la famille de pores intra-agrégat la plus grande - Diminution du volume total du sol 		<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande et la transforme en une famille de pores inter-agrégats naturels - Augmentation du volume total du sol 	
E-MBA-01*	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels
	Taille des pores	0,06 μm	<i>non</i>	0,05 μm	<i>non</i>	0,08 μm	<i>volume non significatif</i>
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec une famille de pores intra-agrégat. - Contenant des ponts carbonatés qui contrarieront le gonflement. 		<ul style="list-style-type: none"> - Le séchage à l'étuve détruit une petite partie de la famille de pores intra-agrégat - Faible diminution du volume total du sol 		<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat et crée une famille de pores inter-agrégats naturels - Faible augmentation du volume total du sol 	
AH**	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels
	Taille des pores	0,015 μm	0,25 μm	0,015 μm	<i>non</i>	0,015 μm	0,9 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure en agrégats avec deux familles de pores : une intra-agrégat et une inter-agrégats. 		<ul style="list-style-type: none"> - Le séchage à l'étuve détruit la famille de pores inter-agrégats - Diminution du volume total du sol 		<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels - Augmentation du volume total du sol 	

(* : Yigzaw 2009 ; ** Il est rappelé que, pour l'argile d'Héricourt AH, l' « Etat initial naturel » correspond à un matériau prélevé sur chantier et non dans la formation géologique en place)

Tableau II : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état remanié

Etat remanié							
Etat hydrique		Etat initial		Séché à l'étuve à 105°C		Saturé (gonflement libre)	
APS	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats			Intra-agrégat	Inter-agrégats
	Taille des pores	0,025 μm et 0,09 μm	volume non significatif			0,025 μm	0,4 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec deux familles de pores intra-agrégat de tailles égales à celles de APS intact. - Le remaniement détruit en partie des amas de Quartz. 				<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande et la transforme en une famille de pores inter-agrégats - Augmentation du volume total du sol 	
APM	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats			Intra-agrégat	Inter-agrégats
	Taille des pores	0,03 μm	non			0,03 μm	0,3 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec une famille de pores intra-agrégat de taille égale à celle de APM intact. - Le remaniement détruit des slickensides. 				<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification ouvre les pores entre des agrégats et crée donc une famille de pores inter-agrégats - Augmentation du volume total du sol 	
API	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats			Intra-agrégat	Inter-agrégats
	Taille des pores	0,01 μm	0,5 μm			0,01 μm	1,7 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure en agrégats avec deux familles de pores : une intra-agrégat et une inter-agrégats. 				<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores inter-agrégats - Augmentation du volume total du sol 	

E-AVR-0*	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats			Intra-agrégat	Inter-agrégats
	Taille des pores	0,02 μm et 0,06 μm	<i>volume non significatif</i>			0,02 μm	0,4 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec deux familles de pores intra-agrégat. - Le remaniement détruit des slickensides. 				<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande et la transforme en une famille de pores inter-agrégats - Augmentation du volume total du sol 	
E-MBA-01*	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats			Intra-agrégat	Inter-agrégats
	Taille des pores	0,06 μm	<i>non</i>			0,06 μm	0,2 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec une famille de pores intra-agrégat. - Le remaniement détruit en partie des amas de calcite. 				<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification ouvre les pores entre des agrégats et crée donc une famille de pores inter-agrégats - Augmentation du volume total du sol 	
AH	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats			Intra-agrégat	Inter-agrégats
	Taille des pores	0,03 μm	<i>volume non significatif</i>			0,015 μm	0,35 μm
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure matricielle argileuse avec une famille de pores intra-agrégat. - Le remaniement détruit une partie de la famille de pores inter-agrégats. 				<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente la taille d'une partie de la famille de pores intra-agrégat et la transforme en une famille de pores inter-agrégats - Augmentation du volume total du sol 	

(*: Yigzaw 2009)

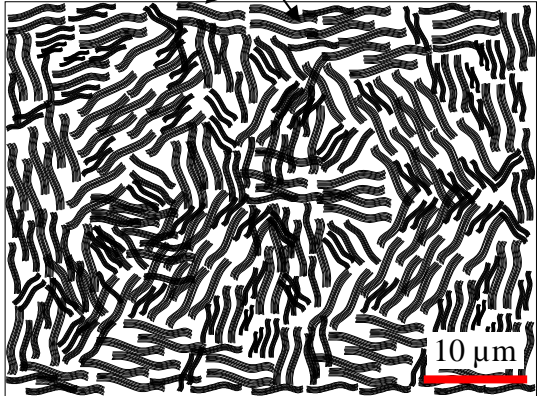
Tableau III : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état compacté

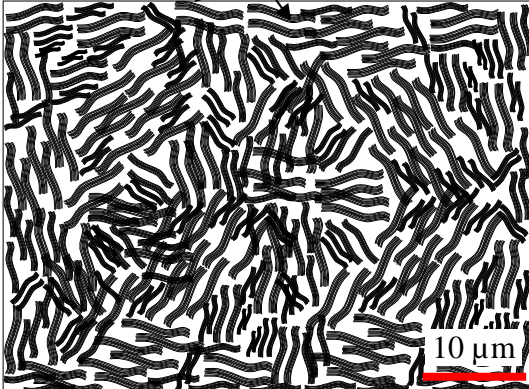
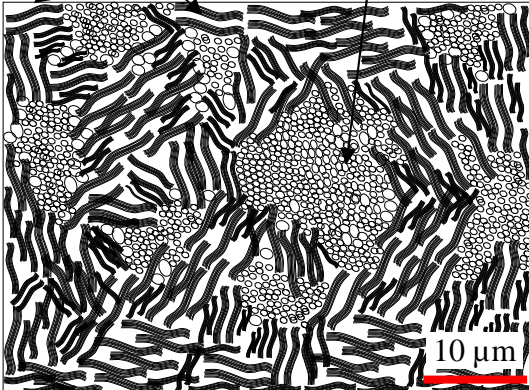
Etat compacté										
Etat hydrique		<i>Etat initial</i>			<i>Séché (dans la chambre environnementale)</i>			<i>Saturé (gonflement libre)</i>		
AH	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Inter-agrégats compactés	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Inter-agrégats compactés	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Inter-agrégats compactés
	Taille des pores	<i>0,015 µm</i>	<i>volume non significatif</i>	<i>10 µm</i>	<i>0,015 µm</i>	<i>volume non significatif</i>	<i>10 µm</i>	<i>0,015 µm</i>	<i>2,5 µm</i>	<i>oui</i>
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none"> - Structure en agrégats compactés avec une famille de pores intra-agrégat, une famille de pores inter-agrégats naturels et une famille de pores inter-agrégats compactés. - Le remaniement (par séchage à l'air libre, broyage, compactage) détruit partiellement la famille de pores inter-agrégats naturels et crée la famille de pores inter-agrégats compactés 			<ul style="list-style-type: none"> - Le séchage détruit la famille de pores inter-agrégats naturels - Diminution du volume total du sol 			<ul style="list-style-type: none"> - L'humidification augmente le volume de la famille de pores inter-agrégats naturels, diminue ou augmente le volume de la famille de pores inter-agrégats compactés mais avec un volume non-significatif. - Augmentation du volume total du sol 		

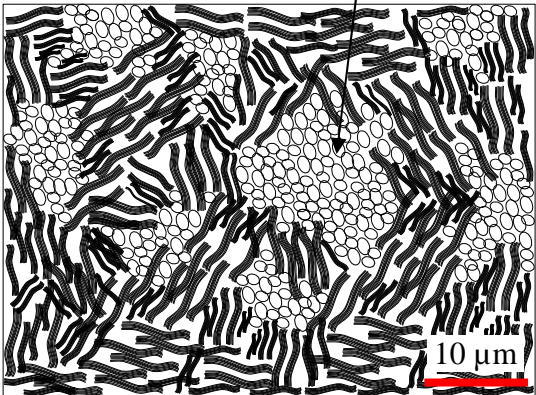
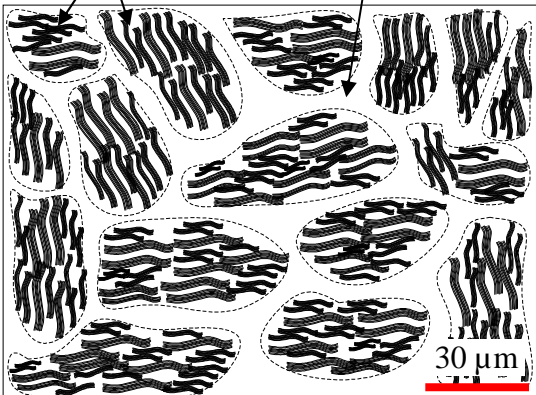
Tableau IV : Synthèse sur les microstructures des sols argileux étudiés, à l'état traité à la chaux et compacté

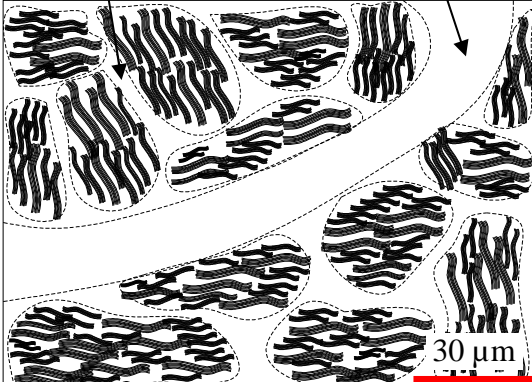
Etat traité à la chaux et compacté										
Etat hydrique		Etat initial			Séché (dans la chambre environnementale)			Saturé (gonflement libre)		
AH	Pores	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Inter-agrégats compactés	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Inter-agrégats compactés	Intra-agrégat	Inter-agrégats naturels	Inter-agrégats compactés
	Taille des pores	0,01 μm	volume non significatif	10 μm	0,01 μm	volume non significatif	10 μm	0,01 μm	3 μm	oui
	Descriptions	<ul style="list-style-type: none">- Structure en agrégats compactés avec une famille de pores intra-agrégat, une famille de pores inter-agrégats naturels et une famille de pores inter-agrégats compactés.- La phase « modification » du traitement à la chaux augmente la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels par floculation.- La phase « stabilisation » du traitement à la chaux diminue le volume de la famille de pores inter-agrégats naturels par remplissage des hydrates créés par la réaction pouzzolanique.			<ul style="list-style-type: none">- Le séchage détruit la famille de pores inter-agrégats naturels- Diminution du volume total du sol			<ul style="list-style-type: none">- L’humidification augmente le volume de la famille de pores inter-agrégats naturels- Augmentation du volume total du sol		
Outre l’effet du séchage et de l’humidification sur la microstructure du sol traité à la chaux, il y a aussi l’effet de la floculation à court terme qui augmente la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels et l’effet de la réaction pouzzolanique à long terme sur la microstructure du sol traité à la chaux qui diminue la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels.										

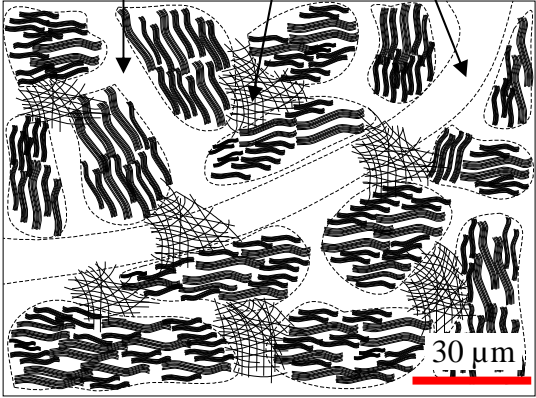
Tableau V : Caractéristiques des microstructures de sols argileux étudiés

	Image(*) (*) 1- La représentation des « particules argileuses » est simplement figurative et pas à l'échelle des figures. 2- En cas de slickensides, ceux-ci ne sont pas représentés, vu l'échelle des figures.	Etat intact initial ou Etat remanié initial ou Etat compacté initial	Etat séché à l'étuve ou séché dans la chambre environnementale	Etat saturé gonflé (gonflement libre)
Structure matricielle argileuse	<p>- avec slickensides : (APM et AVR)</p> <p>Particules argileuses</p> 	<p>Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : 1 famille ou 2 familles ▪ inter-agrégats : non ou volume non significatif. 	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : 1 famille ▪ inter-agrégats : non <p>- Le séchage à l'étuve détruit en partie la famille de pores intra-agrégat ou détruit la famille de pores intra-agrégat la plus grande</p> <p>- Le séchage diminue le volume total du sol</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : 1 famille ▪ inter-agrégats : 1 famille <p>- L'humidification ouvre les pores entre des agrégats et crée donc une famille de pores inter-agrégats naturels ou augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande et la transforme en une famille de pores inter-agrégats naturels.</p> <p>- L'humidification augmente le volume total du sol</p>

<p>- sans slickensides : (APM remanié et AVR remanié) ; (AH remanié)</p> <p>Particules argileuses</p> 	<p>Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ou <i>2 familles</i> ▪ inter-agrégats : <i>non</i> ou <i>volume non significatif</i>. 		<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>1 famille</i> <p>- L'humidification ouvre les pores entre des agrégats et crée donc une famille de pores inter-agrégats naturels ou augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande et la transforme en une famille de pores inter-agrégats naturels.</p> <p>- L'humidification augmente le volume total du sol</p>
<p>- avec amas de quartz : (APS)</p> <p>Particules argileuses</p> <p>Amas de quartz</p> 	<p>Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>2 familles</i> ▪ inter-agrégats : <i>volume non significatif</i>. 	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>non</i> <p>- Le séchage à l'étuve détruit la famille de pores intra-agrégat la plus grande</p> <p>- Le séchage diminue le volume total du sol</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>1 famille</i> <p>- L'humidification augmente la taille de la famille de pores intra-agrégat la plus grande et la transforme en une famille de pores inter-agrégats naturels</p> <p>- L'humidification augmente le volume total du sol</p>

	<p>- avec amas de calcite : (MBA)</p> <p style="text-align: center;"><i>Amas de calcite</i></p> 	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>non</i> 	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>non</i> <p>- Le séchage à l'étuve détruit en petite partie la famille de pores intra-agrégat</p> <p>- Le séchage diminue un peu le volume total du sol</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>volume non significatif</i> <p>- L'humidification augmente la taille d'une partie de la famille de pores intra-agrégat et la transforme en une famille de pores inter-agrégats naturels</p> <p>- L'humidification augmente un peu le volume total du sol</p>
Structure en agrégats naturels	<p>(API intact et remanié, AH intact)</p> <p style="text-align: center;"><i>Agrégats</i> <i>Pores inter-agrégats</i></p> 	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>1 famille</i> 	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>non</i> <p>- Le séchage à l'étuve détruit la famille de pores inter-agrégats</p> <p>- Le séchage diminue le volume total du sol</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>1 famille</i> <p>- L'humidification augmente la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels et/ou un peu la taille de la famille intra-agrégat</p> <p>- L'humidification augmente le volume total du sol</p>

<p>Structure en agrégats compactés</p>	<p>- sans traitement à la chaux (AH compacté) <i>Pores inter-agrégats</i></p> <p><i>Pores inter-agrégats naturels</i> <i>compactés</i></p>  <p>30 μm</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>volume non significatif</i> ▪ inter-agrégats compactés : <i>1 famille</i> 	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>volume non significatif</i> ▪ inter-agrégats compactés : <i>1 famille</i> <p>- Le séchage détruit la famille de pores inter-agrégats naturels</p> <p>- Le séchage diminue le volume total du sol</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats : <i>1 famille</i> ▪ inter-agrégats compactés : <i>1 famille</i> <p>- L'humidification augmente le volume de la famille de pores inter-agrégats naturels, diminue ou augmente le volume de la famille de pores inter-agrégats compactés mais avec un volume non-significatif.</p> <p>- L'humidification augmente le volume total du sol</p>
--	---	--	---	---

<p>- avec traitement à la chaux (AH compacté traité à la chaux)</p> <p>Pores inter-agrégats naturels Pores inter-agrégats compactés</p> <p>Hydrates</p>  <p>30 µm</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : 1 famille ▪ inter-agrégats : 1 famille ▪ inter-agrégats compactés : 1 famille <p>- En présence d'eau, il y aura l'effet de la floculation à court terme qui augmente la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels (plus grande que ceux du sol non-traité) et l'effet de la réaction pouzzolanique à long terme sur la microstructure qui diminue la taille de la famille de pores inter-agrégats naturels par remplissage des hydrates.</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : 1 famille ▪ inter-agrégats : volume non significatif ▪ inter-agrégats compactés : 1 famille <p>- Le séchage détruit la famille de pores inter-agrégats naturels</p> <p>- Le séchage diminue le volume total du sol</p>	<p>- Famille de pores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ intra-agrégat : 1 famille ▪ inter-agrégats : 1 famille ▪ inter-agrégats compactés : 1 famille <p>- L'humidification augmente le volume de la famille de pores inter-agrégats naturels, diminue ou augmente le volume de la famille de pores inter-agrégats compactés mais avec un volume non-significatif.</p> <p>- L'humidification augmente le volume total du sol</p>
---	--	--	--

Références bibliographiques

- Abduljawwad S.N., Al-Sulaimani G.J., Basunbul I.A., Al-Buraim I. (1998)** Laboratory and field studies of response of structures to heave of expansive clay. *Géotechnique*, Vol. 48, No. 1, pp. 103-121.
- Adams J.E., Hanks R.J. (1964)** Evaporation from soil shrinkage cracks. *Soil Science Society of America Proceeding*, Vol. 28, pp. 281-284.
- AFNOR (1993)** Sols : Reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. *NF P 94-051*.
- AFNOR (1995)** Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage. *NF P 94-050*.
- AFNOR (1995)** Sols : Reconnaissance et essais. Masse volumique des sols fins. *NF P 94-053*.
- AFNOR (1995)** Sols : Reconnaissance et essais. Masse volumique des particules solides *NF P 94-054*.
- AFNOR (1996)** Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en carbonate. Méthode du calcimètre. *NF P 94-048*.
- AFNOR (1998)** Sols : Reconnaissance et essais. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. *NF P 94-068*.
- Ahmed S., Lovell C.W., Diamonds S. (1974)** Pore sizes and strength of compacted clay. *ASCE J Geotechnical Eng.* 100, 407- 425.
- Aitchinson G.D., Holmes J.W. (1953)** Aspects of swelling in the soil profile. *Aust. J. Appl. Sci.* 4, 244–259.
- Albrecht B.A., Benson C.H. (2001)** Experimental research on desiccation Cracks in Soil. Research Report 66. Wilmette, Illinois: US Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment.
- Al-Homoud A.S., Basma A.A., Malkawi A.I.H. (1995)** Cyclic swelling behaviour of clays, *Jour. Geotech. Engineer.* 121 (7), pp. 562-565.
- Al-Mukhtar M., Belanteur N., Tessier D., Vanapalli S.K. (1996)** The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states. *Applied Clay Science*, vol. 11, pp. 99-115.
- Alonso E.E., Lloret A., Gens A., Battle F. (1989)** A new approach for the prediction of long term heave. *Proc. 12th ICSMFE*, Rio de Janeiro, vol. 1, pp. 571-574.
- Alonso E.E., Gens A., Lloret A. (1991)** Double structure model for the prediction of long term movements in expansive materials. *Proc. 7th Int. Conf. Comp. Methods and Adv. In Geomech.*, vol. 1, pp. 541–548.

- Alonso E.E., Vaunat J., Gens A. (1999)** Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54, pp. 173-183.
- Al-Rawas A.A., Hago A.W., Al-Sarmi H. (2005)** Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment* 40 (2005) 681–687.
- Aluwihare S., Watanabe K. (2003)** Measurement of evaporation on bare soil and estimating surface resistance. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, Vol. 129, No. 12, pp. 1157-1168.
- Alvenas G., Jansson P.E. (1997)** Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 88, No. 1-4, pp. 47-56.
- ASTM (1985)** Standard test methods for one dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, *ASTM D 4546-96*.
- ASTM (1990)** Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, *ASTM D 5084-10*.
- Audiguier-Marcel M. (1979)** Contribution à l'étude du comportement de l'eau dans les sols en fonction de leur texture. Mémoire de DEA, Centre de Géologie d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 148 p.
- Audiguier-Marcel M., Delage P. (1987)** Etude Microscopique et porosimétrie de sols fins naturels dans une perspective géotechnique. *Actes de la VII^{ème} Réunion Internationale de Micromorphologie des Sols*, Paris, juillet 1985, pp. 493-500.
- Audiguier M., Geremew Z., Cojean R. (2008)** *Relation entre les microstructures de deux sols argileux de la région parisienne et leur sensibilité au retrait-gonflement*. Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris, pp. 235-244.
- Barden L. (1973)** Macro and microstructure of soils. In: Pusch R. (ed). *Proceedings of International Symposium on Soil Structure*. Goteborg (Sweden), vol 1. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, 21-26.
- Basma A.A., Al-Homoud A.S., Malkawi A.H. (1995)** Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Applied Clay Science*, 9, pp. 355-368.
- Basma A.A., Al-Homoud A.S., Malkawi A.I.H., Al-Bashabsheh M.A. (1996)** Swelling-Shrinkage behavior of natural expansive clays. *Applied Clay Science*, 11, pp. 211-227.
- Bell F.G. (1996)** Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4): 223-237.
- Ben Rhaïem H., Pons C.H., Tessier D. (1987)** Factors affecting the macrostructure of smectites. Role of cations and history of applied stresses. *Proc. Int. Clay Conf.* Denver, 292-297.

- Bigot G., Zerhouni M.I. (2000)** Retrait, Gonflement et tassement des sols fins, *Bull. labo. P.et Ch.*, 229, pp. 105-114.
- Blight G.E. (1997)** Interactions between the atmosphere and the Earth. *Géotechnique*. 47(4), p. 715-767
- Boardman D.I., Glendinning S., Rogers C.D.F. (2001)** Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixtures. *Géotechnique* 50, No. 6, 533-543.
- Brutsaert W. (1988)** Evaporation into the atmosphere. Theory, history, and applications. *D. Reidel Publishing Company*, pp. 299.
- Bultel F. (2001)** Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Campbell G.S. (1985)** Soil Physics with Basic, *Transport Models for Soil-Plant Systems*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Cases J.M., Berend I., Delon J.F., François M., Grillet Y., Michot L., Poirier J.E., Yvon J. (1990)** *Quelques aspects de l'étude des propriétés texturales des argiles*. Dans A. Decarreau dir.), atériaux argileux: Structure, propriétés et applications, Soc. Fr. Min. Cristal., Paris, pp. 307-342.
- Chapman D.L. (1913)** A contribution to the Theory of Electrocapillarity. *Philos. Mag* .Ser. 6, 25, 475.
- Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Ménilliet F., Ducreux G.H. (1996)** Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. *Rapport BRGM n° R39218*, 33 p., 6 fig., 1 tab., 4 ann., 1 pl. hors-texte.
- Chen F.H. (1975)** Foundations on expansive soils. Amsterdam : Elsevier. ISBN : 0-444-41393-6. *Developments in Geotechnical Engineering*, vol. 12, 280p.
- Chen F.H., Ma G.S. (1987)** Swelling and shrinkage behaviour of expansive clays. 6th inter. *Conf. Expansive soils*, New Delhi, pp. 127-129.
- Chen F.H. (1988)** Foundations on Expansive Soil. *Elsevier Science Pub.*, New York, NY.
- Chiu T.-F., Shackelford C.D. (1998)** Unsaturated hydraulic conductivity of compacted sand-kaolin mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 160-170.
- Choquette M., Bérubé M-A., Locat J. (1987)** Mineralogical and Microtextural Changes Associated with Lime Stabilization of Marine Clays from Eastern Canada. *Applied Clay Science*, Vol. 2, 215-232.
- Colina H.E. (1992)** Maîtrise de la fissuration de peau du béton : étude géométrique et modélisation. Thèse doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 212 p.

- Collins K., McGown A., Barden L. (1973)** Microstructural features of some Israeli expansive soils. *Proceedings of 3rd International Conference Expansive Soils*, Haifa, Israel, 27-34.
- Collins K., McGown A. (1974)** The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Géotechnique* 24, n° 2, pp 223-254.
- CRC Handbook (1999)** *Handbook of Chemistry and Physics*. 80th ed, Editor-in- Chief: David R. Lide, CRC press.
- Cui Y.J., Yahia-Aissa M., Delage P. (2002)** A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling soils. *Engineering Geology* 64, pp. 233-250.
- Cui Y.J., Loiseau C., Delage P. (2002)** *Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration*. Unsaturated soils, Jucá, de Campos & Marinho (eds), vol 2, pp.593-598.
- Cui Y.J., Lu Y.F., Delage P., Riffard M. (2005)** Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions. *Géotechnique*, Vol. 55, No. 7, pp. 557-567.
- Cui Y.J., Tang A.M., Loiseau C., Delage P. (2008)** Determining the unsaturated hydraulic conductivity of a compacted sand-bentonite mixture under constant volume and free-swell conditions. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 33, No. SUPPL 1, pp. 462-471.
- Cui Y.J., Zornberg J.G. (2008)** Water balance and evapotranspiration monitoring in geotechnical and geoenvironmental engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 783-798.
- Cui Y.J., Gao Y.B., Ferber V. (2010)** Simulating the water content and temperature changes in an experimental embankment using meteorological data, *Eng. Geol.*, 114, 456-471.
- Cui Y.J., Ta A.N., Tang A.M., Lu Y.F. (2010)** Investigation of the hydro-mechanical behaviour of a compacted expansive clay. *Front. Archit. Civ. Eng. China* 2010, 4(2): 154-164.
- Cuisinier O. (2002)** Comportement hydromécanique des sols gonflants. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, 177p.
- Cuisinier O., Masrouri F. (2004)** Microstructure et comportement hydromécanique d'un sol gonflant non saturé, *Revue française de géotechnique*, n°108, pp. 47-56.
- Cuisinier O., Masrouri F. (2005)** Compressibility and structure of an unsaturated compacted soil. *International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. EXPERUS, Trento, Italy, pp. 411–417 (ISBN 0 415 38337 4).
- Cuisinier O., Laloui L. (2004)** Fabric evolution during hydromechanical loading of a compacted silt. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 28(6): 483-499.
- Cuisinier O., Auriol J-C., Le Borgne T., Deneele D. (2011)** Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology* 123, 187-193.

- Dakshanamurthy V., Raman V. (1973)** A simple method of identifying an expansive soil. Soils and foundations. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 13,n° 1,pp. 97–104.
- Daniel D.E. (1982)** Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 46, No. 6, pp. 1125-1129.
- Daupley X. (1997)** Etude du Potentiel de l'eau Interstitielle d'une Roche Argileuse et de Relations entre ses Propriétés Hydriques et Mécaniques. Thèse de l'ENSMP, 172p.
- Day R.W. (1994)** Swell-shrink behavior of compacted clay. *J. Geotechnical Eng.*, ASCE, 120(3), pp. 618-623.
- Day R.W (1995)** Ultimate Density of a compacted clay subjected to cycles of wetting and drying. *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. I, n° 2, pp. 229-232.
- Day R.W. (1995)** Discussion on swell-shrink behavior of a compacted clay, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.* ASCE, 123(8), pp. 385-386.
- DECAGON (2012)** *WP4C Dewpoint PotentialMeter*. Operator's Manual, version 4, pp. 66.
- Delage P. (1979)** Etude du milieu poreux et de la texture d'argiles sensible du Québec. Thèse Doctorat, Université Paris VI, Ecole des Mines Paris.
- Delage P., Lefebvre G. (1984)** Study of the structure of a sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation, *Can. Geotech. J.* 21, pp. 21-35.
- Delage P., Pellerin F.M. (1984)** Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du Québec. *Clay Minerals* 19:151-160.
- Delage P., Audiguier M., Cui Y.J., Howat M.D. (1996)** Microstructure of a compacted silt. *Can Geotech J.* 33, 150-158.
- Delage P., Howat M., Cui Y.J. (1998)** The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology* (50) 1-2, p. 31-48.
- Delage P., Cui Y.J. (2000)** L'eau dans les sols non saturés, *Techniques de l'ingénieur, traité de construction*, C 301-1, 20 p.
- de Vries D.A. (1963)** *Thermal properties of soils. Physics of plant environment*, North-holland publishing company, Amsterdam, pp. 210-235.
- Diamond S. (1970)** Pore size distribution in clays. *Clays and Clay minerals*, 18, pp 7-23.
- Dif A.E., Bluemel W.F. (1991)** Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotech. Testing. Jour.*, 14 (1), pp. 96-102.
- Dixon D.A., Gray M.N., Graham J. (1996)** Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and USA. *Environmental Geotechnics*, vol. 1, pp. 43-48.

- Djéran-Maigre I., Tessier D., Grunberger D., Velde B., Vasseur G. (1998)** Evolution of microstructures and macroscopic properties of some clays during experimental compaction. *Marine and Petroleum Geology* 15 (1998) 109-128.
- Durand C., Forsans T., Ruffet C., Onaisi A., Audibert A. (1995)** *Influence of clays on borehole stability: a literature survey*, part one: Occurrence of drilling problems, physico-chemical description of clays and of their interaction with fluids. Rev. IFP, Vol. 50, n° 2, Mars-Avril 1995.
- Dyer M., Coulson B. (2003)** Fine fissuring of clay fill materials for flood defence embankments. In *Proceedings of the International Conference "From Experimental Evidence Towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils"* Weimar, Germany, Vol.1, pp. 413 – 419.
- Eades J.L., Grim R.E. (1966)** A quick test to determine requirements for lime stabilization. *Highway Research Board Bulletin*, 139: 61-72.
- Fagel N. (2008)** Géologie des argiles, cours en ligne, Université de Liège, <http://www2.ulg.ac.be/urap/cours.htm>
- Ferber V. (2005)** Sensibilité des sols fins compactés à l’humidification – Apport d’un modèle de microstructure. Thèse doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- Gens A., Alonso E.E. (1992)** A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Can. Geotech. J.* 29, pp 1013-1032.
- Gouy G. (1910)** Sur la constitution de la charge électrique à la surface d’un électrolyte. *Journal de physique théorique et appliqué*, vol. 9, pp. 457-468.
- Gray M.N., Cheung S.C.H., Dixon D.A. (1984)** The influence of sand content on swelling pressures and structure developed in statically compacted Na-bentonite. *Atomic energy of Canada Limited*, Report 7825, pp. 1-24.
- Guiras-Skandaji H. (1996)** Déformabilité des sols argileux non saturés : étude expérimentale et application à la modélisation. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 315 p.
- Haines W.B. (1923)** The volume changes associated with variations of water content in soil. *Journal of Agricultural Science*, 13: 296–310.
- Hallaire V. (1988)** La fissuration d’un sol argileux au cours du dessèchement. I. Description in situ. *Agronomie*, 8 (2) 139-145.
- Hemmati S. (2009)** Etude de l’interaction sol-végétation-atmosphère avec une approche couplée Thermo-hydro-mécanique. Thèse de doctorat, Ecole des Ponts ParisTech, 191 p.
- Hillel D. (2004)** Evaporation from bare soil and wind erosion. Introduction to environmental soil physics, *Elsevier*, ed., pp. 337-361.
- Holtz R.D., Kovacs W.D. (1981)** *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Upper Saddle River NJ.

- Hunter D. (1988)** Lime induced heave in sulfate-bearing clay soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE Vol.114, No.2.
- Johnson L.D., Snethen D.R. (1978)** Prediction of potential heave of swelling soils. *Geotechnical Testing Journal*, vol.1, pp. 117–124.
- Kanno T., Wakamatsu H. (1992)** Water uptake and swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, pp. 1102-1107.
- Kassif B., Ben Shalom A. (1971)** Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique*, vol. 21, N°3, pp. 245-255.
- Kayyal M.K. (1995)** Effect of the moisture evaporative stages on the development of shrinkage cracks in soil. In *Proceedings of First International Conference on Unsaturated Soils*, pp. 373-379.
- Kim D.J., Jaramillo R.A., Vauclin M., Feyen J., Choi S.I. (1999)** Modeling of soil deformation and water flow in a swelling soil. *Geoderma*, Vol. 92, No. 3-4, pp. 217-238.
- Komine H., Ogata N. (1992)** Swelling characteristics of compacted bentonite. *Proc. 7th Int. Conf. on Expansive soils*. Vol. 1, pp. 216-221.
- Komine H., Ogata N. (1994)** Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. *Can. Geotech. J.*, 31, pp. 478-490.
- Komine H., Ogata N. (1996)** Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite. *Can. Geotech. J.* 33(1), pp. 11-22.
- Komine H., Ogata N. (2003)** New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. *Can. Geotech. J.* 40, pp. 460-475.
- Komornik A., David D. (1969)** Prediction of swelling pressure of clays. *Proc. ASCE, Journal of Soil Mech. & Found. Div.*, vol. 95, n° SM1, pp. 209-225.
- Kondo J., Saigusa N., Sato T. (1990)** A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 29, No. 5, pp. 385-389.
- Kondo J., Saigusa N., Sato T. (1992)** A model and experimental-study of evaporation from bare-soil surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 31, No. 3, pp. 304-312.
- Kröhn K.-P. (2003)** Results and interpretation of bentonite resaturation experiments with liquid water and water vapour. *From Experimental Evidence towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils*, Weimar, Germany, September 18–19, 2003, éd. par T. Schanz, pp. 257-272.
- Lal R., Shukla M.K. (2004)** *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, Inc., NewYork, Basel, pp. 699.
- Lambe T.W. (1958)** The structure of compacted clay, *J. Geotech. Engng. and Found. Div.*, ASCE, vol. 84, n°2, paper 1654, pp. 1654-1 35.

- Lasledj A., Al-Mukhtar M. (2008)** Effect of Hydrated Lime on the Engineering Behaviour and the Microstructure of Highly Expansive Clay. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India.
- Le Gressus C. (1995)** Microscopie électronique à balayage, *Techniques de l'ingénieur, Analyse et caractérisation*, P 865, 22 p.
- Lemaire T., Moyne C., Stemmelen D. (2004)** Imbibition test in a clay powder (MX-80 bentonite). *Applied Clay Science*, Vol. 26, No. 1-4 SPEC ISS, pp. 235-248.
- Le Roux A. (1969)** Traitement des sols argileux par la chaux, *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, 40, sept.-oct., pp. 59-96.
- Le Roux A. (1971)** La lyophilisation, technique d'étude des textures des marnes et argiles, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°55, pp. 27-28.
- Le Roux A. (1975)** Les différentes textures et leur influence sur le comportement des sols argileux et marneux. *Géologia Applicata Indrogéologia* Vol. X part II, pp. 67-85.
- Le Runigo B. (2008)** Durabilité d'un limon traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydrauliques: comportements physico-chimique, microstructural, hydraulique et mécanique, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 193 p.
- Lima L.A., Grismer M.E. (1992)** Soil crack morphology and soil salinity. *Soil Sci.* 153, 149-153.
- Locat J., Trembley H., Leroueil S. (1996)** Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime, *Canadian Geotechnical Journal* 33, 654-669.
- Loiseau C. (2001)** Transferts d'eau et couplages hydromécaniques dans les barrières ouvragées. Thèse de l'ENPC, 225p.
- Loiseau C., Cui Y.J., Delage P. (2002)** The gradient effect on the water flow through a compacted swelling soil. *Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils (UNSAT 2002)*, Recife, Brazil, éd. par J. F. T. Jucá, T. M. P. de Campos, et F. A. M. Marinho, Lisse: Swets & Zeitlinger, pp. 395-400.
- Magnan J.-P., Youssefian G. (1989)** Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 159, pp. 93-104.
- Mahfouf J.F., Noilhan J. (1991)** Comparative-study of various formulations of evaporation from bare soil using insitu data. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 30, No. 9, pp. 1354-1365.
- Marrot L. (2010)** Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. *Rapport de stage de 3ème année réalisé chez Lhoist*.
- Maubec N. (2010)** Approche multi-échelle du traitement des sols à la chaux. Etudes des interactions avec les argiles, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 217 p.

- McCallister L.D., Petry T.M. (1992)** Leach test on lime treated clays, *Geotechnical Testing Journal* 15, 106-114.
- Meerdink J.S., Benson C.H., Khire M.V. (1996)** Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils. *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, Vol. 122, No. 7, pp. 565-576.
- Metelková Z., Bohác J., Sedlářová I., Prikryl R. (2011)** Changes of pore size and of hydraulic conductivity by adding lime in compacting clay liners, In : Barends et al (eds) *Geotechnical engineering: new horizons, Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers Conference*, Rotterdam, 2011.
- Mi H. (1995)** Kinematic wave formulation for flow through macroporous soil. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Wayne State University, Detroit, MI.
- Miller C.J., Mi H., Yesiller N. (1998)** Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *J. Am. Water Resource. Assoc.*, AWRA 34 (3), 677–686.
- Mitchell J.K. (1993)** *Fundamentals of soil behaviour*. 2ème ed., John Wiley and Sons, New York, 437p.
- Mohamed A.A., Sasaki T., Watanabe K. (2000)** Solute transport through unsaturated soil due to evaporation. *J. Environ. Eng.*, 126(9), 842-848.
- Monteith J.L. (1981)** Evaporation and surface temperature, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 107, 1-27.
- Moore D.M., Reynolds R.C. (1989)** X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, *Oxford University Press*, Oxford.
- Mouroux P., Margon P., Pinte J.-C. (1988)** *La construction économique sur les sols gonflants*. Manuels et Méthodes, 14, BRGM, France.
- Muller C.J. (2005)** Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics, Thèse de Doctorat, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 125 p.
- Multon J.L. (1991)** Techniques d'analyse et de contrôle dans les industries agro-alimentaires. Vol. 4, 2ed., Lavoisier-Tec & Doc.
- Nalbantoglu Z., Tuncer E.R. (2001)** Compressibility and hydraulic conductivity of chemically stabilized expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal* 38, 154-160.
- Norrish K. (1954)** The Swelling of Montmorillonite. *Faraday Soc. Disc*, 18, pp. 120-134.
- Nowamooz H. (2007)** Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Nowamooz H., Masrouri F. (2010)** Influence of suction cycles on the soil fabric of compacted swelling soil. *Comptes Rendus Geoscience* 342 (12), 901-910.

- Onitsuka K., Negami T., Hong Z. (1998)** Microstructure of undisturbed and reconsolidated Ariake clay. *Proceedings of the Eighth International offshore and polar engineering conference*, Montréal, Canada, May 24-29, 1998.
- Onitsuka K., Modmoltin C., Kouno M. (2001)** Investigation on microstructure and strength of lime and cement stabilized Ariake Clay. *Reports of the Faculty of Science and Engineering*, Saga University, Vol. 30, No.1, 49-63.
- Parcevaux P. (1980)** Etude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux. Thèse doctorat, Université Paris VI, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris.
- Pellerin F.M. (1979)** La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées* 106, 105-116.
- Penman H.L. (1948)** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Apr. 22, 1948, pp. 120-145.
- Péron H., Laloui L. (2005)** *An experimental evidence in desiccation cracking in sandy silt*. Advanced experimental unsat. Soil. Mech. Trantino, Romero & Cui (eds), Taylor & Francis Group, London, pp 475- 481.
- Perrier E., Mullon C., Rieu M. (1995)** Computer construction of fractal soil structures: simulation of their hydraulic and shrinkage properties. *Water Resour. Res.* 31, 2927–2943.
- Plummer P.S., Gostin V.A. (1981)** Shrinkage cracks: desiccation or synaeresis. *J. Sediment. Petrol.* 54, 1147–1156.
- Popescu M. (1980)** Behavior of expansive soils with a crumb structure. *4th Inter. Conf. Expansive Soils*, 1, Denver Co., pp. 158-171.
- Prian J-P., Donsimoni M., Vincent M., avec la collaboration de Denis L., Gallas J-C., Marty F., Motteau M. (2000)** *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Essonne*. Rapport BRGM/NP-50376-FR, 273p.
- Prost R. (1990)** *Relations eau-argile : structure et gonflement des matériaux argileux*. dans A. Decarreau (dir.), *Matériaux argileux: Structure, propriétés et applications*, Soc. Fr. Min. Cristall., Paris, P. 343-386.
- Pusch R. (1982)** Mineral - water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na bentonite. *Can. Geotech. J.*, 19, pp381-387.
- Pusch R., Schomburg J. (1999)** Impact of microstructure on the hydraulic conductivity of undisturbed and artificially prepared smectitic clay. *Engineering Geology* 54(1-2), 167-172.
- Pusch R., Yong R. (2003)** Water saturation and retention of hydrophilic clay buffer - microstructural aspects. *Applied Clay Science* 23(1-4), 61-68.
- Qi Y. (1996)** Comportement hydromécanique des argiles: Couplage des propriétés micro-macroscopiques de la laponite et de l'hectorite. Thèse doctorat, Université d'Orléans.

- Qiu G.Y., Yano T., Momii K. (1998)** An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface, *J. Hydrol.*, 210(1-4), 93-105.
- Qiu G.Y., Ben-Asher J. (2010)** Experimental determination of soil evaporation stages with soil surface temperature, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74(1), 13-22.
- Ranganatham B.V., Satyanarayana B. (1965)** A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. Proceedings of the *6th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, pp. 92-96.
- Ridley A.M., Wray W.K. (1995)** Suction measurement: a review of current theory and practices. Proceedings of the *1st International Conference on Unsaturated Soils*, Vol. 3, pp. 1293-1322.
- Ringrose-Voase A.J., Sanidad W.B. (1996)** A method for measuring the development of surface cracks in soils: application to crack development after lowland rice. *Geoderma* 71, 245–261.
- Ritchie J.T., Adams J.E. (1974)** Field measurement of evaporation from soil shrinkage cracks. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, Vol. 38, No. 1, pp. 131-134.
- Robinet J.C., Rahbaoui A., Plas F., Lebon P. (1996)** A constitutive thermomechanical model for saturated clays. *Engineering Geology*, 41, pp. 145-149.
- Rogers C.D.F., Glendinning S. (1996)** *Modification of clay soils using lime*. In: Rogers CDF, Glendinning S, Dixon N (eds) *Lime Stabilisation*, Thomas Telford, London, 99-114.
- Rogers C.D.F., Glendinning S. (2000)** Lime requirement for stabilization. *Transportation Research Record*, 1721: 9-18.
- Romero E., Gens A., Lloret A. (1999)** Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Eng Geol* 54:117–127.
- Romero E., Simms P. H. (2008)** Microstructure investigation in unsaturated soils: A review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. *Geotechnical and Geological Engineering* 26, 705-727.
- Russo G., Dal Vecchio S. (2006)** Microstruttura di un limo sabbioso stabilizzato a calce. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG 2006 Pisa*, 26-28 Giugno 2006.
- Saiyouri N., Hicher P. Y., Tessier D. (1998)** Microstructural analysis of highly compacted clay swelling. *2nd Int. Conf. Unsaturated Soils*, Beijing , vol. I, pp.119-124.
- Santamarina J.C., Klein K.A., Palomino A., Guimaraes M.S. (2002)** *Micro-scale aspects of chemical-mechanical coupling: Interparticle forces and fabric*. Pp. 47-64 in: *Chemo-mechanical Coupling in Clays: From nano-scale to Engineering Applications* (C.D. Maio, T. Hueckel and B. Loret, editors). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands.
- Seed H.B., Woodward R.J.Jr., Lundgren R. (1962)** Prediction of swelling potential for compacted clays. *Jour. Of Soil Mech. & Found. Div.*, ASCE, vol. 88, pp. 53-87.

- Sergeyev Y.M., Osipov V.I., Sokolov V.N., Grabowska-Olszewska (1978)** Types of microstructures of clayey soils. *Proc. 3rd Inter. Cong. Inter. Assoc. of Engineer. Geology*, 1, section II, pp. 319-327, Madrid.
- Serratrice J. F., Soyeux B. (1996)** Les essais de gonflement. *Bull. Labo. P. et C. n°204*. pp. 65-85.
- Sherwood P. (1993)** Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. *London: Transport Research Laboratory, HMSO*.
- Sides G., Barden L. (1971)** The microstructure of dispersed and flocculated samples of Kaolinite, Illite, and Montmorillonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 8 (3), 391-399.
- Simms P.H., Yanful E.K. (2002)** Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions. *Géotechnique* 52(4): 269-278.
- Singh V.P. (1989)** *Watershed modeling. Hydrologic system*. Volume I. Rainfall runoff modeling. Prentice Hall International, Inc., USA.
- Singh V.P., Xu C.Y. (1997)** Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*, Vol. 11, No. 3, pp. 311-323.
- Sitharam T.G., Sivapullaiah P.V., Subba Rao K.S. (1995)** Shrinkage behaviour of compacted unsaturated soils. *Proceedings of the 1st Inter. Conf. Unsaturated Soils Unsat'95*, Paris, vol. 1, pp. 195-200, Balkema/Presses ENPC.
- Song W.K. (2014)** Experimental investigation of water evaporation from sand and clay using an environmental chamber. Thèse doctorat, Université Paris-Est et Tongji University, 321p.
- Songyu L., Heyuan L., Peng J., Yanjun D. (1998)** Approach to cyclic swelling behaviour of compacted clays. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils*, Beijing, China, Vol. 2, pp. 219-225.
- Sridharan A., Rao A.S., Sivapullaiah P.V. (1986)** Swelling pressure of clays. *Geotech. Testing J.*, vol. 9 (1), pp. 24-33.
- Stern O. (1924)** *The Theory of the Electrolytic Double-Layer*. *Zeits. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.* 30, 508.
- Subba Rao K.S., Satyadas G.G. (1987)** Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage. *6th Inter. Conf. Expansive soils*, New Delhi, pp. 137-142.
- Sultan N., Delage P., Cui Y.J. (2002)** Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Engineering Geology*, 64, pp. 135-145.
- Ta A.N. (2009)** Etude de l'interaction sol-atmosphère en chambre environnementale. Thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Tabani P. (1999)** Transfert hydrique dans des sols déformables. Thèse de l'INPL, Nancy, 173p.

- Tanner C.B. (1968)** *Evaporation of water from plants and soil*. Water Deficits and Plant Growth, T. Koslowski, ed., Academic Press, New York.
- Tang C.S., Shi B., Liu C., Wang B.J. (2007)** Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage. *J. Hydraul. Eng.* 38 (10), 1186–1193 (in Chinese).
- Tang C.S., Shi B., Liu C., Wang B.J. (2008)** Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*, 101, pp 204-217.
- Tessier D. (1984)** Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux : Hydratations, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse de l'université Paris VII, 362p.
- Tessier D., Lajudi A., Petit J.C. (1992)** Relation between the macroscopic behaviour of clays and their microstructural properties. *Appl Geochem* 1(Suppl): 151-161.
- Tessier D., Durdaine M., Beaumont A., Jaunet A. (1998)** Swelling pressure and microstructure of an activated swelling clay with temperature. *Clay minerals*, vol. 33, pp. 255-267.
- Touret O., Pons C.H., Tessier D., Tardy Y. (1990)** Etude de la répartition de l'eau dans des argiles saturées Mg^{+2} aux fortes teneurs en eau. *Clay. Min.*, 25, pp. 217-233.
- Tovey N.K. (1973)** *Quantitative analysis of electron micrographs of soil structure*. In: Pusch GR (ed) Proceedings of International Symposium on Soil Structure, vol 1. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, 50-57.
- Tran N-L. (1987)** Gonflement et retrait des argiles. L'eau dans les matériaux. *Journées de Physique LCPC*, Les Arcs, vol. 1, pp. 23-28.
- Tripathy S., Subba Rao K.S., Fredlund D. (2002)** Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Can. Geotech. J.*, 39, pp 938-959.
- van Bavel C.H.M., Hillel D. (1976)** Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agric. For. Meteorol*, Vol. 17, pp. 453–476.
- Van Damme H. (2002)** *L'eau et sa représentation*, dans O.Coussy et J. M. Fleureau (dir.), Mécanique des sols non saturés, Lavoisier, Paris, p. 23-68.
- van de Griend A.A., Owe M. (1994)** Bare soil surface-resistance to evaporation by vapor diffusion under semiarid conditions. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 181-188.
- van Genuchten M.T. (1980)** Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.
- Van Olphen H. (1963)** Internal mutual flocculation in clay suspensions, *J. Colloid Sci.*, 19, pp.313-322.
- Vayssade B. (1978)** Contribution à l'étude du gonflement interparticulaire des sols argileux. Thèse doctorat ENSMP, Paris, 125 p.

- Vijayvergiya V.N., Ghazzaly O.I. (1973)** Prediction of swelling potential for natural clays. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, vol. 1, Haïfa, pp. 227-236.
- Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M., Masrouri F., Oppenheim E., Heck J.-V., Ruaux N., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006)** Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport final. *BRGM/RP- 54862-FR*, 378 p., 308 ill.
- Wang W.C. (2006)** Wind Tunnel Experiments on Bare Soil Evaporation. Master, National Central University, Taiwan, pp. 97.
- Wild S., Arabi M.R., Leng-Ward G. (1993)** Sulphate expansion of lime stabilized kaolinite II: reaction products and expansion. *Clay Minerals* 28, 569-583.
- Wilding L.P., Tessier D. (1988)** *Genesis of Vertisols: Shrink-Swell Phenomena*. In L.P. Wilding & R. Puentes (ed.) *Vertisols: their distribution, properties, classification and management*. Tech. Monogr. no.18. Soil Manage. Support. Serv. Texas A&M Univ. Printing Center, College station, TX.
- Williams J., Shaykewich C.F. (1969)** An evaluation of polyethylene glycol PEG 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matric potential. *Canadian Journal of Soil Science* 102 (6), p. 394-398.
- Wilson G.W. (1990)** Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems. Thèse: Géotechnique, University of Saskatchewan, Saskatchewan pp. 294.
- Wilson G.W., Fredlund D.G., Barbour S.L. (1994)** Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 151-161.
- Wilson G.W., Fredlund D.G., Barbour S.L. (1997)** Effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 145-155.
- Wopereis M.C.S., Bouma J., Kropff M.J., Sanidad W. (1994)** Reducing bypass flow through a dry, cracked and previously puddle rice soil. *Soil Tillage Res.* 29, 1-11.
- Xu Y.F., Matsuoka H., Sun D.A. (2003)** Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures. *Applied Clay Science*, vol. 22, pp. 197-209.
- Yamanaka T., Takeda A., Sugita F. (1997)** A modified surface resistance approach for representing bare-soil evaporation: Wind tunnel experiments under various atmospheric conditions. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 2117-2128.
- Yanful E.K., Choo L.P. (1997)** Measurement of evaporation fluxes from candidate cover soils, *Can. Geotech. J.*, 34(3), 447-459.
- Yanful E.K., Mousavi S.M., Yang M. (2003)** Modeling and measurement of evaporation in moisture-retaining soil covers. *Adv. Environ. Res.*, 7(4), 783-801.
- Yang M., Yanful E.K. (2002)** Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions. *Adv. Environ. Res.*, 6(4), 505-521.

- Ye Z., Pielke R.A. (1993)** Atmospheric parameterization of evaporation from nonplant-covered surfaces. *J. Appl. Meteor.*, 32, 1248-1258.
- Yesiller N., Miller C.J., Inci G., Yaldo K. (2000)** Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. *Eng. Geol.* 57, 105-121.
- Yigzaw Z.G. (2009)** Analyse des processus de retrait-gonflement des sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques. Rôle de la microstructure. Thèse doctorat Mines ParisTech.
- Yigzaw Z.G., Audiguier M., Cojean R. (2009)** Analyse du comportement d'un sol argileux sous sollicitations hydriques cycliques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68: pp. 421-436.
- Yilmaz I. (2006)** Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, n° 85, pp 295-301.
- Yong R.N., Warkentin B.P. (1975)** Soil properties and behaviour. *Elsevier*, 449 pp.
- Yong R.N. (1999)** Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers. *Engineering Geology*, 54, pp 3-13.
- Zein el Abedine A., Robinson G.H. (1971)** A study on cracking in some vertisols of the Sudan. *Geoderma* 5, 229-241.

Les résultats obtenus au cours de cette recherche ont fait l'objet de plusieurs présentations et publications dont la liste est donnée ci-dessous :

Articles :

Tran T.D., Audiguier M., Cojean R. (2012) Analyse des rôles de la microstructure et de la composition minéralogique de trois sols argileux du bassin de Paris sur leur sensibilité au retrait – gonflement. *Revue Française de Géotechnique*. (accepté)

Tran T.D., Cui Y. J., Tang A.M., Audiguier M., Cojean R. (2013) Effects of lime treatment on the microstructure and the hydraulic conductivity of Héricourt clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. (soumis)

Tran T.D., Song W.K., Audiguier M., Cojean R., Tang A.M., Cui Y. J. (2013) Investigating the microstructure of clayey soil under wetting and/or drying. *Engineering Geology*. (soumis)

Song W.K., Cui Y. J., Tang A.M., Ding W.Q., **Tran T.D.** (2014) Experimental study on water evaporation from sand using environmental chamber. *Canadian Geotechnical Journal*, 51 (2), 115-128.

Communications orales :

Tran T.D., Audiguier M., Cojean R. (2012) Rôles de la microstructure et de la composition minéralogique de sols argileux du bassin de Paris sur leur sensibilité au retrait-gonflement. *Journées nationales de Géotechnique et de la Géologie de l'Ingénieur*, JNGG juillet 2012, Bordeaux.

Tran T.D., Audiguier M., Cojean R. (2012) Experimental study of the sensitivity to shrink/swell behaviour of clayey soils in the Paris Basin. *10th Swiss Geoscience Meeting*, SGM november 2012, Bern.

Tran T.D., Audiguier M., Cojean R. (2013) Etude comparée de la microstructure de sols argileux par analyse porosimétrique et observation au microscope électronique à balayage. *Conférence Franco-Vietnamienne de la Construction et du développement durable*, CIGOS avril 2013, Lyon.

Tran T.D., Tang A.M., Cui Y. J., Audiguier M., Cojean R. (2013) Effets du traitement à la chaux sur la microstructure et la conductivité hydraulique de l'argile d'Héricourt. *Colloque sur le traitement des sols pour un terrassement durable*, TerDOUEST juin 2013, Marne la Vallée.

Tran T.D., Audiguier M., Cojean R. (2013) Phénomènes de vieillissement rhéologique de sols argileux du bassin de Paris soumis à des cycles hydriques accélérés. *Journées Scientifiques du GFHN*, Novembre 2013, Poitiers.

Tran T.D. (2013) Rôle de la microstructure des sols argileux dans les processus de retrait-gonflement : de l'échelle de l'éprouvette à l'échelle de la chambre environnementale. *Séminaire du Centre de Géosciences – MINES ParisTech*, Décembre 2013, Fontainebleau.

Rapport :

Cojean R., Audiguier M., **Tran T.D.** (2013) Synthèse des résultats des caractérisations minéralogique, géotechnique, micro-structurale et mécanique des Argiles Plastiques du Sparnacien du bassin de Paris et d'une argile du Lias de l'Est de la France (argile d'Héricourt). Comparaison avec les résultats obtenus sur les Argiles Vertes de Romainville et les Marnes Bleues d'Argenteuil. Analyse du rôle de la microstructure des sols argileux dans les phénomènes de retrait-gonflement. *Projet ARGIC2*.

Rôle de la microstructure des sols argileux dans les processus de retrait-gonflement : de l'échelle de l'éprouvette à l'échelle de la chambre environnementale

RESUME : Le processus de retrait-gonflement des sols argileux est à l'origine des dommages au bâti durant les périodes de sécheresse. Dans cette thèse, les processus de retrait-gonflement de deux formations de sols argileux en France qui sont les Argiles Plastiques du Sparnacien et l'argile d'Héricourt du Lias sont étudiés à différentes échelles et différents états (intact, remanié, compacté et traité à la chaux) en considérant spécialement le rôle de la microstructure. Pour ce faire, une partie de la recherche est réalisée sur la caractérisation des sols étudiés pour analyser leurs propriétés minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydriques par rapport à leur propriété de retrait-gonflement. La deuxième partie de la recherche est consacrée à l'analyse des processus de gonflement, de retrait, de fissuration des sols au cours d'un cycle simple ou de cycles répétés d'humidification-séchage à l'échelle de l'éprouvette. Les processus de retrait-gonflement de sol à une échelle plus grande sont étudiés dans la troisième partie en réalisant les essais d'infiltration et d'évaporation dans une chambre environnementale. Les résultats obtenus mettent en évidence les différences de comportement au retrait-gonflement pour différents états des sols étudiés. Les minéraux argileux ainsi que le quartz, les carbonates et des hydrates, mais aussi la microstructure des sols contrôlent ces phénomènes de retrait-gonflement lors des échanges hydriques. Tous les changements de volume de sol argileux au cours de gonflement-retrait sont gouvernés principalement par la famille de pores inter-agrégats naturels. Ces résultats sont apportés par les analyses microstructurales porosimétriques et au MEB.

Mots clés : minéralogie, microstructure, retrait, gonflement, évaporation, chambre environnementale.

Role of microstructure of clayey soils in the shrink-swell process: from specimen scale to environmental chamber scale

ABSTRACT: The shrink-swell process of clayey soils is causing damage to the structures during periods of drought. In this thesis, the shrink-swell process of two clayey soils in France that are the Plastic Clays of Sparnacian age and Héricourt clay of Lias is studied at different scales and different conditions (intact, remoulded, compacted and lime treated) by insisting on the role of microstructure. To do this, a part of the study is carried out on the characterisation of soils studied to analyse their mineralogical, microstructural, geotechnical and hydraulic properties in relation with their shrink-swell property. The second part of the study focuses on the analysis of swelling, shrinkage, cracking processes of soil during a single cycle or repeated wetting-drying cycles at specimen scale. The shrink-swell process of soil at a larger scale is studied in the third part by performing infiltration and evaporation tests in the environmental chamber. The results highlight the difference in the shrink-swell behavior at different conditions of soils studied and emphasize the importance of the presence and nature of clay minerals also quartz, hydrates and microstructure of soil to the shrinkage and swelling during water exchange. All changes in the volume of clayey soil during shrinkage and swelling are mainly governed by natural inter-aggregate pores, which are showed by microstructural analyses of MIP and SEM tests.

Keywords: mineralogy, microstructure, shrinkage, swelling, evaporation, environmental chamber.

